

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Structure de Recherche : Laboratoire de Matière Condensée et Sciences Interdisciplinaires (LaMCScl)

Discipline : Physique

Spécialité : Sciences des matériaux

Présentée et soutenue le 31 /10 / 2020 par :

Charaf LAZRAK

CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION PHYSIQUE, MECANIQUE, ET A LA VALORISATION DU BOIS DE PIN MARITIME (*PINUS PINASTER*) EN PANNEAUX COMPOSITES BOIS-POLYMERE

JURY

<i>Abdelaziz MHIRECH</i>	<i>PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Rabat</i>	<i>Président</i>
<i>Bousselham KABOUCHI</i>	<i>PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Rabat</i>	<i>Directeur de thèse</i>
<i>Fatima KIFANI-SAHBAN</i>	<i>PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Rabat</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>
<i>Mohsine ZIANI</i>	<i>PES, Institut National des Sciences de l'Archéologie et du Patrimoine- Rabat</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>
<i>Mohammed CHERRAJ</i>	<i>PH, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Rabat</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>
<i>Mohamed RAHOUTI</i>	<i>PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Rabat</i>	<i>Examineur</i>

Année Universitaire : 2020 – 2021

DEDICACES

JE DEDIE CETTE THESE

***À MES PARENTS, QUI ONT
TOUJOURS CRU EN MOI***

***À MA FEMME QUI M'A OFFERT
L'ENVIRONNEMENT IDEAL DE TRAVAIL***

***À MES FRERES ET SŒUR, QUI M'ONT
TOUJOURS SOUTENU***

***A TOUS LES MEMBRES DE
NOS FAMILLES***

ET A TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé au sein du Laboratoire de Matière Condensée et Sciences Interdisciplinaires (LaMCScI), sous la direction de monsieur Bouselham KABOUCHI et en collaboration avec le Centre de Recherche Forestière (CRF) de Rabat.

Je tiens à remercier vivement Monsieur Bouselham KABOUCHI (Directeur de Thèse), Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat. Les mots me manquent pour exprimer ma gratitude. Je vous suis reconnaissant pour le temps que vous m'avez accordé, et pour vos qualités pédagogiques et scientifiques.

Je remercie Monsieur Abdelaziz MHIRECH, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat pour avoir accepté de présider mon Jury de thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Madame Fatima KIFANI-SAHBAN, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse et pour l'intérêt qu'elle a porté à ce travail tout au long de la période du confinement, pour ses multiples conseils et pour le temps qu'elle a consacré à la lecture de mon document de thèse. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité et ses qualités humaines d'écoute et de compréhension.

Je suis particulièrement reconnaissant à Monsieur Mohsine ZIANI, Professeur de l'Enseignement Supérieur à l'Institut National des Sciences de l'Archéologie et du Patrimoine (INSAP) de Rabat, pour son aide dans la rédaction de ce document et d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse.

De même, Je tiens à remercier vivement Monsieur Mohammed CHERRAJ, Professeur habilité à la Faculté des Sciences de Rabat, pour l'intérêt qu'il a manifesté à l'égard de mon travail de recherche en s'engageant à être rapporteur et examinateur.

Je remercie Monsieur Mohamed RAHOUTI, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat pour avoir accepté de faire partie de mon Jury de thèse.

Je tiens à remercier aussi Monsieur Abderrahim FAMIRI, Docteur Es-Sciences Physiques et Chef du Service de Technologie du Bois et Valorisation des Produits Forestiers au Centre de la Recherche Forestiers (CRF) de Rabat pour sa confiance, ses suggestions pertinentes et son aide précieuse.

Mes remerciements s'adressent aussi au Professeur Abdel-illah HAKAM pour son soutien, les idées partagées, son aide et encouragements durant les années de Master et de Doctorat.

Je souhaite aussi exprimer ma gratitude au personnel du Centre de la Recherche Forestière de Rabat, au personnel du Centre Technique des Industries du Bois et d'Ameublement de Casablanca et Celui du laboratoire de l'Université Chung-Ang à la Corée du Sud pour leur soutien et leur collaboration.

Je ne saurais oublier de remercier Mehdi LAZRAK (Ingénieur d'Etat), Bouchra LAZRAK (doctorante), Rayhana IDRISSE (Ingénieur d'Etat), Adnane EL HAMIDI (Professeur assistant à la Faculté des Sciences de Rabat) et Maryama HAMMI (doctorante).

Résumé

Le présent travail concerne la caractérisation dendrométrique, physique et mécanique du bois de quatre arbres de pin maritime, sa valorisation en panneaux composite bois-polymère (CBP) et l'application de quelques méthodes d'analyse ((FTIR), (DRX), angle de contact et (MEB)) sur ces panneaux. Les mesures dendrométriques indiquent que les arbres étudiés sont stables et résistants. Les mesures des indicateurs des contraintes de croissance (ICC) ont révélé que le bois étudié est un bois de compression. Le rendement de sciage des grumes est de l'ordre de 58 %. Par ailleurs, les profils de l'humidité et de l'infra-densité du bois varient significativement selon la position radiale. En outre, le séchage naturel du bois donne plus de déformations des planches que le séchage artificiel. D'après les résultats de la caractérisation physique et mécanique, le bois étudié peut être classé comme bois, mi-lourd, peu nerveux, à retrait de séchage moyennement élevé, tendre, rigide et résistant. Ce qui limite son utilisation comme bois d'œuvre. Nous avons étudié ensuite les propriétés mécaniques de composites bois-plastique (CBP). Nous avons mis en évidence que les propriétés de résistance à la traction et en flexion des composites peuvent être améliorées en augmentant la teneur en polymère (PEHD, PP) et avec l'addition d'agent de couplage (CaCO_3). Ceci affecte également leurs morphologies et leurs stabilités. Les meilleures performances ont été obtenues pour les panneaux composés de polymère recyclé. Ces composites bois-plastique pourront être utilisés pour fabriquer des panneaux stables et solides. L'analyse par FTIR/ATR et DRX indiquent l'absence d'interactions chimiques entre les polymères recyclés (PEHDr, PPr) et la farine de bois de pin maritime d'une part, et la diminution de la rugosité en fonction de l'augmentation de la teneur en farine avec l'ajout de CaCO_3 d'autre part. La technique MEB montre l'influence de la teneur en polymère dans le composite sur la morphologie des échantillons bois-PEHDr.

Mots-clefs (5) : Bois ; Pin maritime ; Composite bois-polymère ; Propriétés physiques et mécaniques ; morphologie.

Abstract

The present work concerns the dendrometric, physical and mechanical characterization of the wood of four maritime pine trees, its valorization in wood-polymer composite panels (WPC) and the application of some analysis methods (FTIR), (XRD), Contact Angle and (SEM)) on these panels. Dendrometric measurements indicate that the trees studied are stable and resistant. Measurements of growth stress indicators (GSI) revealed that the wood studied is a compression wood. The sawing yield of the logs is about 58 %. In addition, the moisture and infra-density profiles of the wood vary significantly according to radial position. In addition, natural drying of the wood gives more deformation of the boards than artificial drying. Based on the results of the physical and mechanical characterization, the wood studied can be classified as medium-heavy, low-strength, medium-drying shrinkage, soft, stiff and resistant. This limits its use to lumber. We then studied the mechanical properties of wood-plastic composites (WPC). We showed that the tensile and flexural strength properties of composites can be improved by increasing the polymer content (HDPE, PP) and with the addition of coupling agent (CaCO₃). This also affects their morphology and stability. The best performance has been obtained for panels made of recycled polymer. These wood-plastic composites can be used to make stable and strong panels. FTIR/ATR and DRX analysis indicate the absence of chemical interactions between recycled polymers (HDPEr, PPr) and maritime pine wood flour on the one hand, and the decrease in roughness as the flour content increases with the addition of CaCO₃ on the other hand. The SEM technique shows the influence of the polymer content in the composite on the morphology of the wood-PEHDr samples.

Key Words (5) : Wood ; Maritime pine ; Wood-polymer composite ; Physical and mechanical properties ; morphology.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	---

CHAPITRE I

Introduction	4
--------------------	---

I.1. Pin maritime : Situation géographique, Anatomie, description physiques et mécaniques du bois	5
--	---

I.1.1. Pin Maritime et son aire de répartition	5
--	---

I.1.2 Anatomie du bois des résineux	7
---	---

I.1.2.1. Macrostructure d'un tronc d'arbre	7
--	---

I.1.2.2. Microstructure des résineux	9
--	---

I.1.2.3. Ultrastructure du bois	10
---------------------------------------	----

I.1.2.4. Composition du bois.....	11
-----------------------------------	----

I.1.2.4.1. La cellulose	12
-------------------------------	----

I.1.2.4.2. Les hémicelluloses	12
-------------------------------------	----

I.1.2.4.3. La lignine	13
-----------------------------	----

I.1.2.4.4. Les extractibles	13
-----------------------------------	----

I.1.2.4.5. Les cendres.....	14
-----------------------------	----

I.1.2.4.6. L'eau	14
------------------------	----

I.1.3. Propriétés physiques du bois	14
---	----

I.1.3.1. Teneur en humidité.....	14
----------------------------------	----

I.1.3.2. Point de saturation des fibres (PSF).....	15
--	----

I.1.3.3. Variations dimensionnelles du bois	16
---	----

I.1.3.4. Coefficient de rétractabilité (α_v)	17
---	----

I.1.3.5. Densité et infra-densité.....	17
--	----

I.1.4. Propriétés mécaniques du bois	18
--	----

I.1.4.1. Anisotropie et orthotropie du bois.....	18
I.1.4.2. Comportement élastique du bois	19
I.1.4.3. Comportement à la rupture du bois	20
I.1.4.4. Propriétés acoustiques et vibratoires du bois	21
I.2. Polymères synthétiques pétrosourcés	23
I.2.1. Polymères thermoplastiques	23
I.2.2. Caractéristiques du polypropylène (PP) et du polyéthylène haute densité (PEHD).....	24
I.2.3. Effets de l'eau sur les polymères	26
I.3. Composites bois-polymère (CBP).....	28
I.3.1. Composition, architecture et particularités des composites (CBP)	29
I.3.2. Renforts végétaux	29
I.3.3. Matrice organique.....	30
I.3.4. Interface, adhésion dans les composites (CBP).....	31
I.3.5. Additifs dans les composites (CBP)	31
I.3.6. Proportions des constituants	32
I.3.7. Morphologie, dispersion et orientation des fibres	33
I.3.8. Humidité	34
I.3.9. Stabilité thermique.....	35
I.3.10. Fabrication des composites bois polymères (CBP).....	35
Conclusion.....	36

CHAPITRE II

Introduction	38
II.1. Pin maritime	39
II.1.1. Origine et choix des arbres échantillons	39
II.1.2. Dendrométrie des arbres échantillons	39
II.1.3. Mesure des indicateurs de contraintes de croissance	40
II.1.4. Techniques d'abattage, d'ébranchage et de tronçonnage des arbres	42
II.1.5. Sciage des grumes et son rendement	45
II.1.6. Confection des éprouvettes et des planches	46
II.1.7. Séchages naturel et artificiel des planches	48
II.1.7.1. Séchage naturel	48
II.1.7.2. Séchage artificiel.....	49
II.1.8. Mesures de la teneur en humidité, de l'infra-densité et des variations dimensionnelles.....	50
II.1.9. Point de saturation des fibres	51
II.1.10. Essai de compression axiale	52
II.1.11. Essais de dureté	53
II.1.12. Essais BING	54
II.2. Polymères synthétiques	56
II.3. Composites Bois-Polymère	57
II.3.1. Matières premières	57

II.3.2. Formulation des CBP	59
II.3.3. Procédé de fabrication des CBP	59
II.3.4. Tests d'immersion dans l'eau.....	61
II.3.5. Essais de traction.....	62
II.3.6. Essais de flexion 3 points	63
II.3.7. Spectroscopie FTIR / ATR.....	64
II.3.8. Diffraction aux rayons X.....	65
II.3.9. Microscopie électronique à balayage	65
II.3.10. Angle de contact.....	66
Conclusion.....	67

CHAPITRE III

Introduction	69
III.1. Pin maritime	70
III.1.1. Caractéristiques dendrométriques des arbres échantillons	70
III.1.2. Indicateurs de contraintes de croissance (ICC).....	71
III.1.3. Rendement de sciage.....	73
III.1.4. Caractérisation physique du pin maritime	74
III.1.4.1. Profils d'humidité et d'infra-densité de la première bille	74
III.1.4.1.1. Profil d'humidité	74
III.1.4.1.2. Profil d'infra-densité	75
III.1.4.2. Cinétiques de séchage naturel et artificiel	76

III.1.4.3. Propriétés physiques du pin maritime	79
III.1.4.4. Variation inter-arbres des propriétés physiques	79
III.1.4.4.1. Variation de l'infra-densité	80
III.1.4.4.2. Variation du retrait volumétrique.....	80
III.1.4.4.3. Variation du Point de saturation des fibres	80
III.1.5. Caractérisations mécaniques du pin maritime	81
III.1.5.1. Résistances et modules	81
III.1.5.2. Variation inter arbre des propriétés mécaniques	82
III.1.5.2.1. Variation du module d'élasticité Timoshenko	82
III.1.5.2.2. Variation de la résistance en compression axiale.....	82
III.1.5.2.3. Variation du Chiffre de dureté Monnin.....	83
III.1.6. Corrélations entre les propriétés mécaniques et physiques du bois.....	83
III.1.7. Récapitulatif sur les résultats de la caractérisation du pin maritime.....	84
III.2. Composites Bois-Polymère.....	86
III.2.1. Caractérisation physique des CBP	86
III.2.1.1. Densité des CBP après 2h et 24h d'immersion	86
III.2.1.2. Absorption d'eau par les CPB après 2h et 24h d'immersion.....	87
III.2.1.3. Gonflement en épaisseur des CPB après 2h et 24h d'immersion...	87
III.2.1.4. Saturation en eau des CBP	89
III.2.2. Caractérisation mécanique des CBP	90
III.2.2.1. Résistance et module de traction	90
III.2.2.2. Résistance et module en flexion	91
III.2.3. Caractérisations spectrale et microscopique des CBP	92
III.2.3.1. Caractérisations infra-rouges du bois, des polymères et des CBP .	92
III.2.3.1.1. Analyse du spectre du bois.....	93
III.2.3.1.2. Analyse du spectre de CaCO ₃	93
III.2.3.1.3. Analyse du spectre de PEHDr.....	93

III.2.3.1.4. Analyse du spectre de PPr	94
III.2.3.1.5. Analyse des spectres des CBP	95
III.2.3.2. Angle de contact	96
III.2.3.3. Diffractions des rayons X	98
III.2.3.3.1. Diffractogramme du bois	99
III.2.3.3.2. Diffractogramme du CaCO ₃	99
III.2.3.3.3. Diffractogramme du PEHDr	99
III.2.3.3.4. Diffractogramme du PPr	99
III.2.3.3.5. Diffractogramme des CBP	100
III.2.3.4. Analyse par microscopie électronique à balayage	101
III.2.4. Récapitulatif sur résultats de la caractérisation des CBP	103
Conclusion et perspectives	106
Références	112
Annexes	136

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.1 Composition moléculaire de la fraction organique du pin maritime	12
Tableau.2 Etat du bois suivant son taux d'humidité	15
Tableau.3 Rétractibilité volumétrique totale en %	16
Tableau.4 Coefficient de rétractibilité volumétrique totale en %	17
Tableau.5 Données relatives aux caractéristiques du pp et du PEHD	25
Tableau.6 Propriétés physiques et mécaniques des différents plastiques utilisés	57
Tableau.7 Caractéristiques dendrométriques des 4 arbres échantillon.....	70
Tableau.8 Valeurs des ICC des arbres échantillons mesuré avant abattage.....	72
Tableau.9 Valeurs angulaires des profils des ICC mesurées.....	72
Tableau.10 Valeurs calculées des profils d'ICC par le modèle sassus.....	73
Tableau.11 Rendement du sciage.	73
Tableau.12 Propriétés physiques du bois mesurées sur 120 éprouvettes normalisées..	79
Tableau.13 Valeur moyenne expérimentale de l'infra densité et des ICC pour les quatre arbres.....	80
Tableau.14 Valeur moyenne expérimentale du retrait volumétrique et des ICC pour les quatre arbres.....	80
Tableau.15 Caractéristiques mécaniques moyennes du bois de pin maritime.....	82
Tableau.16 Angles de contact mesures et calculs des CBP.	98
Tableau.A1.1 Classifications des études sur les composites (CBP) selon le polymère utilisé.....	137
Tableau.A1.2 Suite de la classification des études sur les composites (CBP) selon le polymère utilisé.....	138
Tableau.A4.1 Absorption d'eau et gonflement en épaisseur des CBPEHD.....	141
Tableau.A5.1 Absorption d'eau et gonflement en épaisseur des CBPP.....	142
Tableau.A6.1 Valeurs de traction et de flexion des CBPEHD.....	143
Tableau.A7.1 Valeurs de traction et de flexion des CBPP.....	144
Tableau.A8.1 Angles de contact mesurés et calculés des CBPEHD.....	145

Tableau.A8.2 Angles de contact mesurés et calculés des CBPPr.....	145
Tableau.A9.1 Angles de contact mesurés et calculés des CBPEHDr avec 7 % de CaCO ₃	146
Tableau.A9.2 Angles de contact mesurés et calculés des CBPPr avec 7 % de CaCO ₃	146

LISTE DES FIGURES

Figure.1. Description de l'arbre du pin maritime et de sa situation géographique.....	6
Figure.2. Coupe transversale du tronc d'un arbre.....	8
Figure.3. Coupe anatomique du bois des résineux.....	9
Figure.4. (a) Paroi secondaire est constituée de S ₁ , S ₂ et S ₃ ; (b) θ : Angle entre microfibrille et axe de la cellule.	11
Figure.5. Chaîne de cellulose et maillon de base	12
Figure.6. Structure chimique partielle d'hémicelluloses : arabino-4-O méthylglucuronoxylane de résineux	13
Figure.7. Précurseurs de la biosynthèse de la lignine	13
Figure.8. Directions principales et plans ligneux du bois à droite, plans de symétrie ou d'orthotropie à gauche.	19
Figure.9. Courbe contrainte-déformation en traction et en compression dans la direction axiale et transverse du bois.	21
Figure.10. (a) : Traces contraintes-déformations des polymères en traction ; (b) : Evolutions typiques du module d'Young avec la température des thermoplastiques.	25
Figure.11. (a) Reboisement du pin maritime dans la forêt de maâmora (zone en rouge) ; (b) Echantillon de l'arbre du pin maritime.	39
Figure.12. (a) Répartition des 4 arbres échantillons ; (b) Arbre échantillon numéroté avant écorçage ; (c) Mesure de la circonférence du tronc ; (d) Ecorçage de l'échantillon d'arbre de pin maritime et localisation des huit positions pour mesures des ICC	40
Figure.13. Mesure des indicateurs de contraintes de croissance.....	42
Figure.14. Techniques d'abattage, d'ébranchage et de tronçonnage des arbres.....	44
Figure.15. Scies à grume.	45
Figure.16. Différentes étapes de confection des éprouvettes.....	47
Figure.17. Etapes de prélèvement des éprouvettes EH et EID pour les mesures respectives des profils d'humidité, d'infra-densité et des différents retraits.....	48
Figure.18. Disposition des planches au cours du séchage naturel sous abri.....	49

Figure.19. Schéma du séchoir Cathild	49
Figure.20. Balance électronique type Sartorius ; comparateur électronique type Mitutoyo.....	51
Figure.21. Eprouvettes Emec soumises à la compression axiale	53
Figure.22. Presse Testwel pour essais de compression.....	53
Figure.23. (a) Presse Testwel pour essai de dureté sur le bois ; (b) Conséquence de l'essai de dureté sur les échantillons du bois.	54
Figure.24. Illustration de l'essai vibratoire bing.	55
Figure.25. Signal temporel enregistré suite à une percussion.....	56
Figure.26. Polymère vierge et recyclé.....	57
Figure.27. (a) Matière première du bois de pin maritime ; (b) Broyeur a couteaux haute performance SM2000 Retsch ; (c) Farine de bois du pin maritime.	58
Figure.28. Polymères synthétiques brut et recyclé broyés.....	58
Figure.29. Formulation des composites bois-polymère.	59
Figure.30. Moule métallique et presse hydraulique.....	60
Figure.31. Dimensions d'éprouvette de traction la norme ASTM D638-99 (type I). .	62
Figure.32. Essai de traction.	63
Figure.33. Essai de flexion.	64
Figure.34. Appareil de mesure de la spectroscopie FTIR-ATR	64
Figure.35. Appareil de mesure de la diffraction des rayons X	65
Figure.36. Microscope électronique à balayage (MEB).	65
Figure.37. Cam-200 de ksv-finland.	66
Figure.38. Représentation polaire des ICC pour les quatre arbres de pin maritimes...	72
Figure.39. Profils expérimentaux des ICC pour chaque arbre des 4 arbres du pin maritime.	72
Figure.40. Profils modelisé et expérimental des ICC.	73
Figure.41. Histogrammes représentant le rendement moyen par arbre.	74
Figure.42. Eprouvettes EH et EID utilisées pour les mesures de l'humidité et d'infra-densité du bois.	75
Figure.43. Profils d'infra-densité des rondelles en bois de pin maritime	76

Figure.44. Evolutions des séchages naturel (à gauche) et artificiel (à droite) du bois, de leurs dérivées et de leurs modélisations.....	78
Figure.45. Variation de l'infra-densité, du retrait volumique et du psf en fonction de la direction radiale pour chacun des 4 arbres échantillons.	81
Figure.46. Variation du module d'élasticité Timoshenko, de la résistance en compression axiale et du chiffre de dureté Monnin pour chaque arbre	83
Figure.47. Evolutions du E_{CA} , du E_D , de Ca et de N du pin maritime en fonction de la densité à 11 % d'humidité des quatre arbres.	84
Figure.48. Evolution du module d'élasticité en compression axiale du bois de pin maritime en fonction de la densité à 11% d'humidité pour 120 échantillons.	84
Figure.49. Absorption et gonflement pendant 2 et 24 heures des CBP examinés.	88
Figure.50. Gonflement en épaisseur à saturation en eau des CBP examinés.	89
Figure.51. Résistance et module de traction des différents CBP.	91
Figure.52. Résistance et module en flexion des différents CBP.	92
Figure.53. Spectres FTIR / ATR du bois, du $CaCO_3$, du PEHDr et du PPr	95
Figure.54. Spectres FTIR / ATR des CBPr avec ou sans $CaCO_3$	96
Figure.55. Angles de contact des différents CBP.	97
Figure.56. Angles de contact de l'eau mesures et calculs pour les CBP.	98
Figure.57. Diffractogrammes du bois, du $CaCO_3$, du PEHD et du PP.	100
Figure.58. Diffractogrammes des différentes formulations de CBP.	101
Figure.59. Micrographies MEB des compositions (Bois-PEHDr) agrandissement de 150 fois.	102
Figure.60. Micrographies MEB des compositions (Bois-PEHDr) agrandissement de 1500 fois.	103
Figure.61. Micrographies MEB de la composition (Bois-PEHDr) avec 7% de ($CaCO_3$), agrandissement de 1500 fois.	103
Figure.A1.1. Schéma d'une extrudeuse.	132
Figure.A1.2. Moulage par compression d'après Trotignon.	133
Figure.A1.3. Schéma du procédé d'injection.	134
Figure.A3.1. Séchage du bois de pin maritime. Cas du séchage naturel à l'air libre sous abri.	140

Figure.A3.2. Séchage des planches de pin maritime par le séchage artificiel.....140

LISTE DES ABREVIATIONS

M_H	: Masses du bois à une certaine humidité interne.
M_0	: Masses du bois à l'état anhydre.
V_s	: Volumes de l'éprouvette aux états saturés.
V_0	: Volumes de l'éprouvette aux états anhydre.
V_h	: Volumes de l'éprouvette aux états humide.
α_T	: Coefficient de retrait tangentiel.
α_R	: Coefficient de retrait Radial.
α_L	: Coefficient de retrait longitudinal.
C_{ij}	: Matrices de rigidité.
S_{ij}	: Matrices de souplesse.
L	: Direction longitudinale parallèle axe des fibres.
R	: Direction radiale perpendiculaire aux cernes.
T	: Direction tangentielle aux cernes de croissance.
LR	: Plan radial.
LT	: Plan tangentiel.
RT	: Plan transversal.
E_R	: Modules d'élasticité ou modules d'Young dans la direction radiale.
E_L	: Modules d'élasticité ou modules d'Young dans la direction longitudinale.
E_T	: Modules d'élasticité ou modules d'Young dans la direction tangentielle.
G_{TL}	: Modules de cisaillement sur le plan tangentiel.
G_{LR}	: Modules de cisaillement sur le plan radial.
G_{RT}	: Modules de cisaillement sur le plan transversal.
ν_{TR}	: Coefficients de Poisson sur le plan transversal.
ν_{TL}	: Coefficients de Poisson sur le plan tangentiel.
ν_{RL}	: Coefficients de Poisson sur le plan radial.
ν_{RT}	: Coefficients de Poisson sur le plan transversal.
ν_{LT}	: Coefficients de Poisson sur le plan tangentiel.
ν_{LR}	: Coefficients de Poisson sur le plan radial.
ρ	: Masse volumique.

PE	: Polyéthylène.
PEHD	: Polyéthylène haute densité.
PP	: Polypropylène.
PS	: Polystyrène.
PVC	: Polychlorure de vinyle.
Tg	: Température de transition vitreuse.
FTIR	: Infrarouge à transformée de Fourier.
DRX	: Diffraction aux rayons X.
MEB	: Microscope électronique à balayage.
CBP	: Composite Bois-Polymère.
CBPr	: Composite Bois-Polymère recyclé.
CBPEHD _r	: Composite Bois-Polyéthylène haute densité recyclé.
CBPP _r	: Composite Bois-Polypropylène recyclé.
MOE	: Module d'élasticité.
MOR	: Module de rupture.
ICC	: Indicateurs de contraintes de croissance.
a _L	: Déformation de maturation.
K	: Constante.
D _d	: Variation de distance entre les pointes.
CRF	: Centre de la recherche forestier de Rabat.
R _s	: Rendement secondaire du sciage.
V _{pi}	: Volume des planches juste après sciage ou délignage.
V _{Billon}	: Volume de la grume.
EH	: Epreuve d'humidité.
Eid	: Epreuve d'infra-densité.
E _{phy}	: Epreuve de l'essai physique.
E _{vib}	: Epreuve de l'essai vibratoire.
E _{méc}	: Epreuve de l'essai mécanique.
L _{RS}	: Dimension de l'éprouvette au sens radial à l'état saturé.
L _{TS}	: Dimension de l'éprouvette au sens tangentiel à l'état saturé.
L _{LS}	: Dimension de l'éprouvette au sens longitudinal à l'état saturé.

L_{R0}	: Dimension de l'éprouvette au sens radial à l'état anhydre.
L_{T0}	: Dimension de l'éprouvette au sens tangentiel à l'état anhydre.
L_{L0}	: Dimension de l'éprouvette au sens longitudinal à l'état anhydre.
PSF	: Point de saturation des fibres.
σ	: Contrainte de rupture en compression.
R_h	: Charge maximale de rupture à l'humidité H%.
N	: Dureté Monnin.
v	: Vierge.
r	: Recyclé.
E_{TR}	: Essai de traction.
E_{F3}	: Essai de flexion 3 points.
eh	: Epaisseur de l'échantillon après immersion dans l'eau.
e_0	: Epaisseur de l'échantillon avant immersion dans l'eau.
W	: Largeur dans la zone de la longueur de référence.
L	: Longueur de la partie calibrée étroite.
WO	: Largeur totale.
LO	: Longueur totale.
G	: Longueur de référence.
D	: Ecartement entre outillage.
H	: Epaisseur de l'éprouvette.
CTIBA	: Centre technique des industries du bois et d'ameublement.
σ_f	: Résistance à la flexion.
E_b	: Module d'élasticité en flexion.
P	: Charge à mi-longueur.
L	: Longueur de l'éprouvette.
l	: Largeur de l'éprouvette perpendiculairement à la direction de chargement.
e	: Epaisseur de l'éprouvette testée parallèlement au sens de chargement.
K	: Pente de la partie linéaire initiale de la courbe de déviation de la charge.
ht	: Hauteur totale.
$C_{1,3}$: Circonférence à 1m30cm.
C_{base}	: Circonférence à la base.

- E_e : Epaisseur écorce.
- V_{billon} : Volume billon.
- CaCO_3 : Carbonate de calcium.
- Θ_m : Angle de contact mesuré.
- Θ_c : Angle de contact calculé.

INTRODUCTION GENERALE

Les écosystèmes forestiers Marocains représentent des réservoirs floristiques et faunistiques d'une diversité et d'une complexité incontestable. Puisque ces ressources sont limitées le Maroc a entrepris un plan de reboisement d'est les années soixante [1], Parmi ces plantations, le pin maritime (*Pinus Pinaster*), et ce grâce à ses caractéristiques diverses (croissance rapide, longévité assez faible, fort enracinement qui assure une bonne fixation du sable, adaptation aux sols pauvres), ainsi que ses vertus socioéconomiques (écorce, bois, résines). Notre étude ces porté sur quatre arbre du pin maritime reboisées issues de la région de Mechra el Ketan à la forêt de Maâmoura Occidental. Notre premier objectif consiste, à la caractérisation physique et mécaniques du bois de cette essence afin d'optimiser sa valorisation technologique. Cette valorisation va nous permettre d'utiliser ce bois d'une manière rationnelle soit au niveau du bois massif ou de ces sous-produits générés par sa première transformation à savoir le sciage, le rabotage, le délignage....

D'autre part, au niveau mondial, la production de la matière plastique ne cesse d'augmenter. En particulier, au Maroc, d'après le Ministère du Commerce Marocain, le sous-secteur de la fabrication des articles en plastique a connu au cours de la période 1993-1998 une augmentation de l'ordre de 71%. Cette production génère bien évidemment des sous-produits sous forme de chute au niveau de la fabrication et des déchets de consommation qui peuvent avoir des conséquences néfastes sur l'environnement. Notre deuxième objectif consiste à la valorisation des déchets de bois générer par sa première transformation, et la valorisation des polymères synthétiques recyclé collectés afin de produire un nouveau matériau, composite bois-polymère (CBP), à faible coût, caractérisés par une faible masse volumique et qui constitue une contribution socio-économique intéressante au développement durable [2-4].

Ce mémoire de thèse se compose de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous commençons par la présentation de rappels bibliographiques concernant la description géographique de la forêt du pin maritime dans le bassin méditerranéen et en particulier au Maroc, ainsi que des rappels de

quelques propriétés physiques et mécaniques du bois. Ensuite, nous exposons les types et les classifications des additifs utilisés dans l'élaboration des panneaux bois-plastique (CBP) ainsi que les paramètres influençant les procédés de leur fabrication.

Le deuxième chapitre est consacré au protocole expérimental suivi pour la détermination des propriétés physiques et mécaniques du bois de pin maritime. Nous présentons après la méthodologie et les critères pour la fabrication des panneaux CBP, ainsi que leur caractérisation par des essais physiques et mécaniques et par des techniques d'analyses structurales telles que l'infrarouge à transformée de fourrier (FTIR), diffraction des rayons X (DRX), et microscopie à balayage (MEB).

Dans le troisième chapitre, nous présentons d'abord les résultats obtenus concernant les propriétés physiques et mécaniques du bois de pin maritime étudié. Nous discutons ensuite les résultats physiques (absorption de l'eau et du gonflement), mécaniques (essai de traction et de flexion) et les analyses structurales (FTIR, DRX, le MEB) des différents composites bois-plastique (CBP) élaborés.

CHAPITRE I

Pin maritime

*Revue bibliographique sur la structure, les caractéristiques physiques et mécaniques
du matériau bois*

Polymère synthétique

Revue bibliographique sur les différents types de polymères synthétiques

Composites Bois-Polymères

Composition, architecture, classification et procédés de fabrication des CBP

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons, d'une part, une description géographique du pin maritime dans le monde et en particulier au Maroc, une description de la structure de ce bois à différentes échelles d'observation, la présentation de quelques propriétés physiques et mécaniques, à savoir, l'humidité, le point de saturation des fibres, la variation dimensionnelle, la densité, l'infra-densité, la compression axiale, la dureté, respectivement, ainsi que la présentation des propriétés acoustiques par la méthode vibratoire. D'autre part nous allons décrire les différents types de polymères, la caractérisation mécanique, thermiques et l'effet de l'eau sur les polymères synthétiques objet de notre travail. Finalement, nous allons décrire les types de composites CBP, leurs classifications et les additifs utilisés dans la fabrication de ce type de matériau, ainsi que leurs procédés de fabrication et les paramètres influençant sur leurs propriétés.

I.1. Pin maritime : Situation géographique, Anatomie, description physiques et mécaniques du bois

I.1.1. Pin Maritime et son aire de répartition

D'une manière générale, l'arbre peut être décomposé en deux grandes parties : une partie souterraine et une partie aérienne. La partie souterraine correspond aux racines qui sont responsables du prélèvement de l'eau et des nutriments et de l'ancrage au sol. La partie aérienne est faite du tronc et des branches qui supportent les feuilles dans lesquelles se fait la photosynthèse.

Le pin maritime (*Pinus pinaster*), en particulier, est une espèce de conifères de la famille des Pinacées, qui est un arbre à houppier clair et irrégulier, qui peut atteindre 30 m de hauteur [5], d'une longévité faible d'environ 100 ans. Cette essence a une écorce dense et épaisse même chez les jeunes individus, d'une couleur rougeâtre-noire chez les sujets adultes [6]. Les aiguilles, vert brillant, sont très longues mesurant environ 10 à 25 cm de longueur. Les cônes, groupés par 2 ou 3, de couleur variant du vert au brun-roux, sont gros et remarquablement longs de 08 à 22 cm. Les graines sont brun noir brillant en dessus et gris mate en dessous [7,8].

C'est une essence très plastique qui croît sur toute sorte de terrain. Elle se développe soit à l'état pur soit en mélange avec d'autres essences forestières sous des conditions écologiques très diverses. Sa limite supérieure atteint les 2100 m d'altitude dans le Haut Atlas, s'interfère avec le cèdre ou le sapin alors que sa limite inférieure borde le littoral [9]. Il existe dans des zones avec plus de 1400 mm de précipitations annuelles et sans saison sèche, à d'autres avec 350 mm et plus de 4 mois de saison sèche [8]. Son aire de répartition naturelle est sur le bassin méditerranéen, comprise entre le 31^{ème} et 46^{ème} de latitude Nord et entre le 8^{ème} de longitude Ouest et le 13^{ème} de longitude Nord, couvrant une superficie très fragmentée de 4 millions d'hectares [9]. En particulier, au Maroc, l'aire de sa répartition naturelle est très dispersée, avec une superficie d'environ 14.000 ha [9].



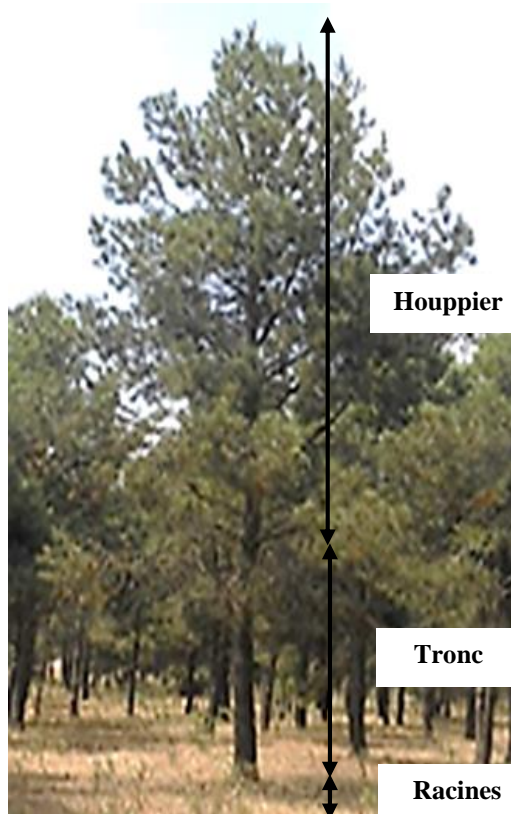
(b) Inflorescences femelles



(c) Inflorescences mâles



(d) Aiguilles



(a) Arbre du pin maritime



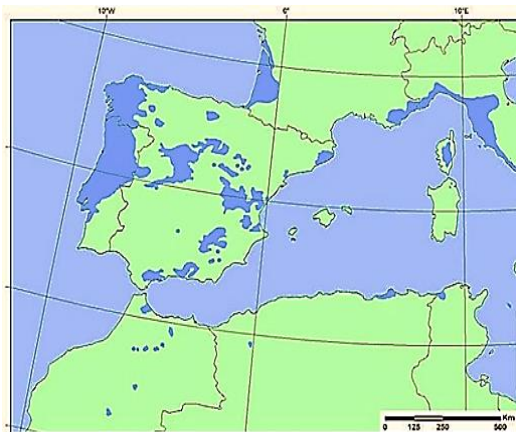
(e) Ecorce



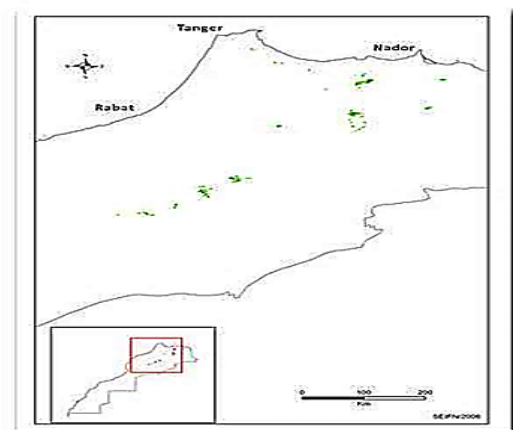
(f) Fruit



(g) Plantule



(h) Carte de distribution naturelle du pin maritime (EUFORGEN 2008).



(i) Répartition du pin maritime sur le terrain marocain (HCEFLCD).

Fig.1. Description de l'arbre du pin maritime et de sa situation géographique.

I.1.2 Anatomie du bois des résineux

Le bois est la matière ligneuse qui constitue le tronc, les branches et les racines des arbres recouverts par l'écorce. La description et l'anatomie d'une coupe transversale du tronc d'un arbre est décrite au niveau macroscopique et celles du bois des résineux aux niveaux microscopique et ultramicroscopique comme il est proposé dans ce qui suit.

I.1.2.1. Macrostructure d'un tronc d'arbre

De l'extérieur vers l'intérieur d'une coupe transversale du tronc d'un arbre, il y a l'écorce, le cambium, le bois et la moelle [10, 11]. L'écorce est constituée d'une partie externe et une autre interne respectivement le rhytidome et le liber (décrits ci-dessous). La partie du bois contiguë au cambium est l'aubier et celle à même la moelle est le bois de cœur ou duramen (figure 2). La coupe transversale met également en évidence des cernes de croissance et des rayons médullaires.

L'écorce externe ou périphérique, le rhytidome, est un tissu mort et crevassé. Le rhytidome protège la sève qui transite dans les vaisseaux du liber, l'arbre contre les agressions extérieures et assure les échanges gazeux pour les tissus vivants notamment le cambium et l'aubier [12]. L'aspect de l'écorce est fin et lisse chez les arbres jeunes alors qu'il est épais, rugueux, fibreux et craquelé chez les arbres adultes [13]. Son épaisseur n'est pas la même le long du fût de l'arbre et est très variable à la même hauteur des arbres d'une même essence [14].

L'écorce interne ou liber ou encore phloème, est un tissu conducteur de la sève, élaborée dans les feuilles, et transportées aux différentes parties de l'arbre. Le liber est produit, vers l'extérieur, par le cambium [15]. Lorsque les cellules du liber meurent, elles sont poussées vers l'extérieur et forment le rhytidome.

Le cambium est une couche entre l'écorce et le bois ou plus précisément entre le liber et l'aubier. Le cambium assure la croissance de l'arbre et produit annuellement, dans le sens radial du tronc, des cellules qui se différencient en liber vers l'extérieur et en bois vers l'intérieur. Le liber et le bois forment des couches concentriques appelées cernes dont la largeur est un indicateur des conditions de croissance [16,17]. Le nombre

des cernes augmente dans le duramen alors que celui de l'aubier reste relativement constant [18]. Les cernes sont traversés par les rayons ligneux (médullaires) qui ont un rôle important en matière d'esthétique [19].

L'aubier est un bois physiologiquement actif. Il occupe une partie de la section transversale beaucoup plus petite que celle occupée par le duramen. L'aubier est plus jeune, plus poreux, plus claire, plus tendre, plus léger et plus hydraté que le duramen. L'aubier assure le stockage des nutriments et la conduction de la sève brute des racines vers les feuilles [20].

Le duramen ou bois de cœur ou encore bois parfait est métaboliquement inactif puisque les nutriments n'y circulent plus. Le duramen résulte de la duraminisation des vieilles cellules de l'aubier. Cette opération, accompagnée de la biosynthèse de tannins, gomme et pigments [21], colore les membranes des cellules et rend conséquemment la couleur du duramen plus foncée que celle de l'aubier. La duraminisation épaissit et durcit également les membranes des cellules initialement minces dans l'aubier, le duramen fournit ainsi le soutien structurel à l'arbre [22, 23, 24].

La moelle, tissu mou et spongieux, se trouve dans la partie interne du duramen [25,26]. Elle se forme au début de la croissance de l'arbre, assure le stockage et le transport des nutriments essentiels d'où son utilité quand l'arbre est jeune.

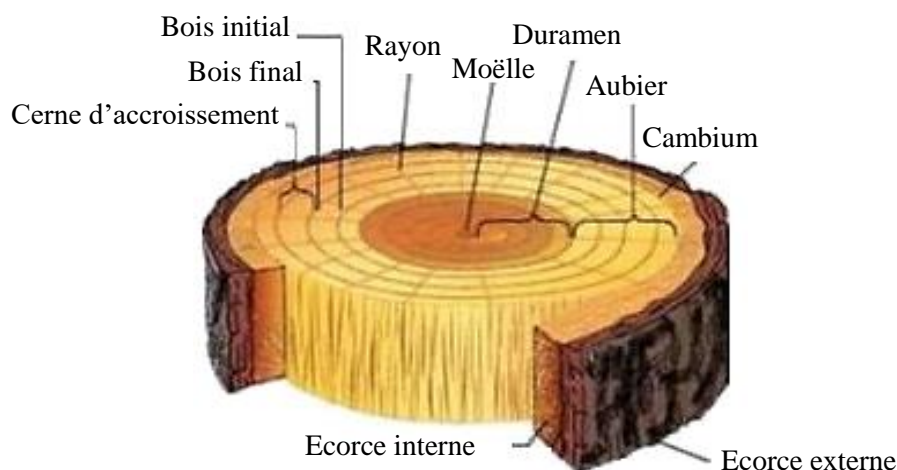


Fig.2.Coupe transversale du tronc d'un arbre [24].

I.1.2.2. Microstructure des résineux

Chez les résineux, le bois est composé de deux types de cellules, les trachéides et les parenchymes (figure 3) [27].

Les trachéides, sont minces, allongées et empilées les unes sur les autres parallèlement à l'axe de l'arbre, représentent jusqu'à 95 % du volume du bois et remplissent les fonctions de conduction de la sève et de soutien mécanique. Elles développent une paroi épaisse et lignifiée mais certaines zones sont dépourvues de lignine et de paroi secondaire. Ces zones sont les ponctuations aréolées qui permettent les échanges transverses de la sève ascendante entre trachéides latérales [28]. La sève ascendante circule également verticalement dans le lumen des trachéides adjacentes [29,30].

Les réserves du bois en sève élaborée sont assurées par le parenchyme. Ce dernier est un tissu continu qui croît soit axialement, parallèlement aux trachéides, soit radialement en formant la majeure partie des rayons ligneux. De même, quelques canaux résinifères peuvent se trouver dans le sens des trachéides et/ou dans le sens radial [31].

Ces canaux sont des cavités tubulaires formés de cellules de parenchyme dont les plus internes sont sécrétrices de résine dans la lumière du canal [32,19].

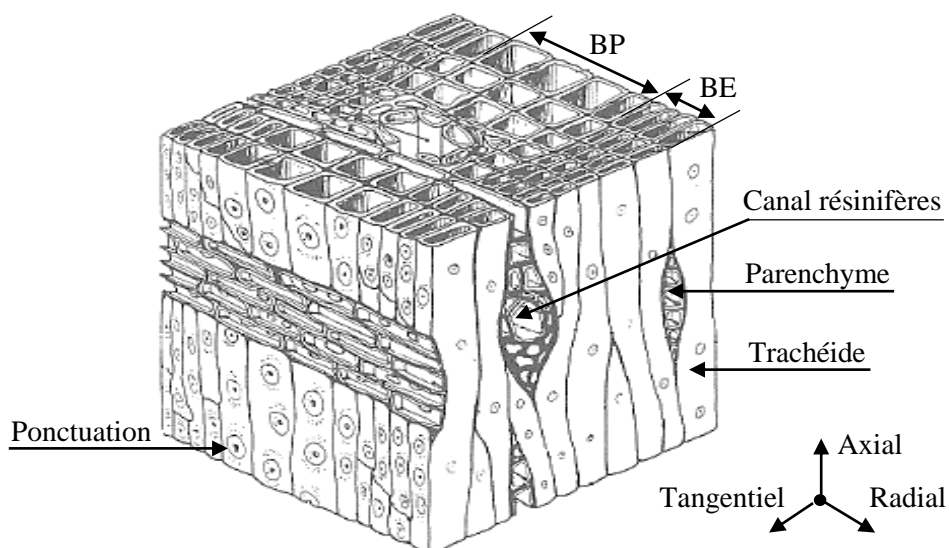


Fig.3. BP et BE : Bois de printemps et d'été respectivement.

Coupe anatomique du bois des résineux [33].

I.1.2.3. Ultrastructure du bois

La paroi cellulaire du bois est multicouche. Elle est composée d'une couche intercellulaire, d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire (figure 4). Chaque couche est un composite constitué de microfibrilles de cellulose scellée dans une matrice de lignine et d'hémicelluloses.

La couche intercellulaire, ou lamelle mitoyenne, est une fine membrane de séparation constituée de substances pectiques. Elle est plus mince dans le bois initial que dans le bois final, son épaisseur est comprise entre 0,5 et 1,5 μm . Les procédés de défibrage du bois consistent notamment à détruire cette lamelle par attaque chimique [34].

La paroi primaire, d'une épaisseur environ 0,1 μm , est constituée d'un enchevêtrement de microfibrilles de cellulose dans lesquelles se déposent de la lignine, des substances pectiques et des hémicelluloses [34].

La paroi secondaire est une couche épaisse, dense et rigide. Elle a une forte teneur en cellulose et constitue ainsi la partie de la cellule la plus résistante mécaniquement. Les hémicelluloses, lignine et matières pectiques se déposent dans les microfibrilles de cellulose dont l'orientation définit trois sous-couches :

La couche externe S_1 , d'une épaisseur de 0,1 à 0,35 μm , présente une structure lamellaire. Les microfibrilles de cellulose forment un angle de 60 à 80 ° avec l'axe longitudinal.

La couche centrale S_2 représente environ 80 % de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire. Elle peut mesurer de 1 à 10 μm en fonction de sa localisation dans l'accroissement annuel. Les microfibrilles de cellulose forment un angle de 5 à 30° avec l'axe longitudinal.

La couche interne S_3 est mince et son épaisseur est d'environ 0,5 à 1,1 μm . Les microfibrilles de cellulose sont orientées de 60 à 90 ° par rapport à l'axe longitudinal. La couche S_3 porte parfois une paroi verruqueuse constituée d'épaississements spirales [35].

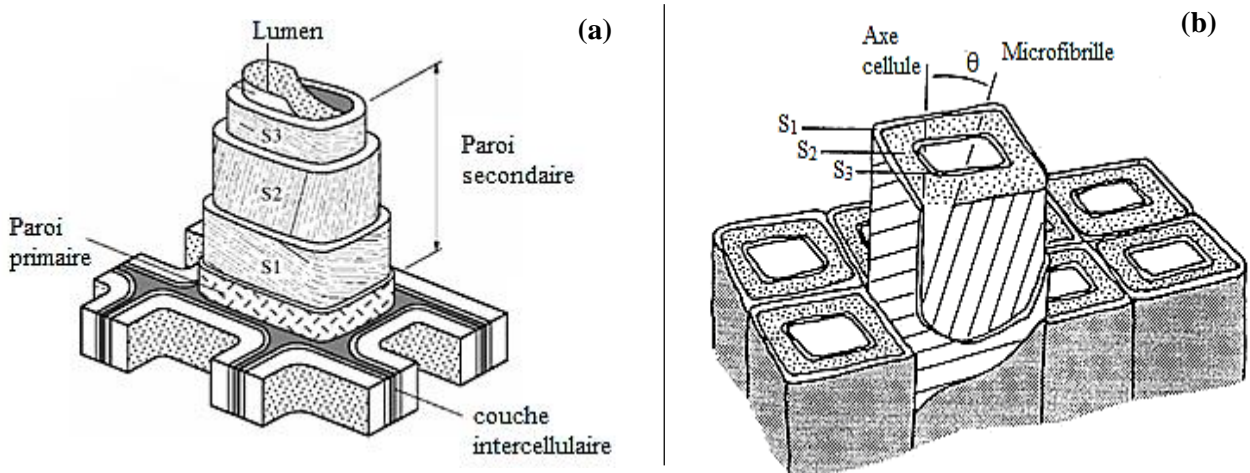


Fig.4. (a) Paroi secondaire est constituée de S₁, S₂ et S₃ ; (b) θ : angle entre microfibrille et axe de la cellule [36,37].

I.1.2.4. Composition du bois

Sur le plan de la chimie élémentaire, le bois contient environ 50% de carbone, 6 % d'hydrogène, 44 % d'oxygène, 1 % d'azote et d'autres minéraux à l'état de trace.

Sur le plan moléculaire, les éléments chimiques précités se combinent pour former une fraction organique et des extractibles. Ces molécules représenteraient environ 59 % du bois vert, le reste forme la fraction aqueuse du bois. La composition chimique de la fraction organique et celle des extractibles du pin maritime sont données sur le tableau 1 [38].

La fraction organique du bois est un composite complexe de trois biopolymères de cellulose, d'hémicelluloses et de lignines. Quelques informations sur ces macromolécules, sur les extractibles, les cendres et la fraction aqueuse sont précisées dans les paragraphes ci-après.

Tableau.1 Composition chimique de la fraction organique du pin maritime [38].

Constituants		% (masse sèche)
Cellulose		47,1
Hémicelluloses	Pentosanes	12,3
	Mannanes	9,9
	Galactanes	3,0
		} 25,5
Lignine		25,6
Résine		2 à 4
Tannins et Gommés		1,3
Protéines		1,0
Cendres		0,3

I.1.2.4.1. La cellulose

La cellulose est le constituant le plus abondant du bois. C'est un polymère de configuration structurée de façon linéaire et rigide. La présence de nombreux groupements OH en périphérie facilite l'organisation de ces chaînes qui se regroupent pour former des bâtonnets de cellulose. Dans ces bâtonnets, la cellulose est sous forme cristalline avec localement des zones amorphes.

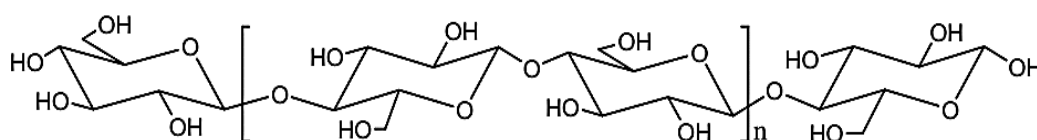


Fig.5.Chaine de cellulose et maillon de base [39].

I.1.2.4.2. Les hémicelluloses

Dans le bois, les hémicelluloses sont intimement liées à la cellulose, elles composent 15 à 30 % du bois selon l'essence considérée [40], différenciées de la cellulose par des chaînes moléculaires beaucoup plus courtes. En général, les hémicelluloses ont une structure amorphe, elles peuvent être classées généralement en quatre grands groupes : les xyloglucanes, les xylanes, les mannanes et les glucanes [41].

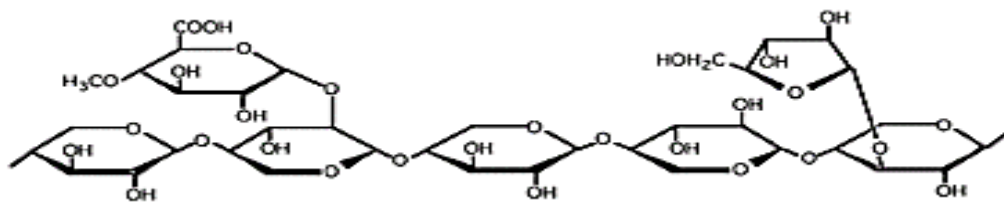


Fig.6. Structure chimique partielle d'hémicelluloses : Arabino-4-O-méthylglucuronoxylane de résineux [40].

I.1.2.4.3. La lignine

Après la cellulose, la lignine est la substance organique la plus abondante dans les plantes. Elle est chimiquement très différente de la cellulose et des hémicelluloses. C'est un polymère tridimensionnel, amorphe et de nature phénolique, qui assure la rigidité de la paroi cellulaire. Dans le bois, la lignine est biosynthétisée à partir de trois alcools phénoliques : l'alcool coniférylique, ou guaiacyle, l'alcool sinapylique, ou syringyle et l'alcool paracoumarylique ou hydroxyphényle notés respectivement unités G, S et H [42]. La lignine résulte de la polymérisation radicalaire de ces trois composés présents en quantités variables suivant les espèces de bois. La figure 7 présente le Précurseurs de la biosynthèse de la lignine.

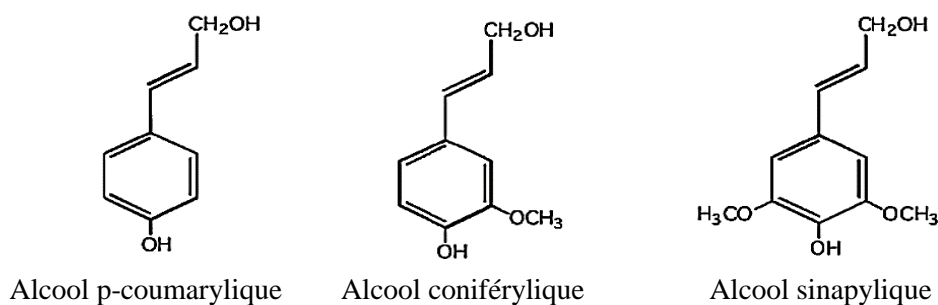


Fig.7. Précurseurs de la biosynthèse de la lignine [35].

I.1.2.4.4. Les extractibles

Les extractibles sont des molécules qui peuvent être extraites du bois par des solvants polaires (acétone, eau, éthanol) ou apolaires (toluène, cyclohexane, dichlorométhane). La teneur et la composition de ces extractibles varient fortement d'une essence à l'autre, les résineux en contiennent généralement plus que les feuillus.

Il existe trois types d'extractibles : les terpénoïdes (myrcène, limonène, pinène, ...), les polyphénols (tannins condensés et hydrolysables, flavonoïdes, tropolones, stilbènes, quinones, ...) et les composés aliphatiques (acides gras saturés et insaturés, triglycérides, alcaloïdes, ...) [34].

I.1.2.4.5. Les cendres

Ce sont les résidus minéraux obtenus après combustion du bois à haute température. La composition des cendres de bois est très variable et dépend principalement du combustible utilisé et des conditions de combustion (température, degré de combustion). D'une manière très générale, le bois ramené à sa masse anhydre produit 2 à 5 % de cendres [43].

I.1.2.4.6. L'eau

Dans le bois, l'eau y est présente sous formes libre ou capillaire, vapeur, liée ou adsorbée et de constitution. Ce n'est que sur pied que toutes ces formes existent dans le bois. Une fois abattu, l'eau libre s'évacue progressivement avec le séchage et la vapeur prend place. L'évacuation complète de l'eau libre correspond au point de saturation des fibres PSF. En dessous de ce point, il n'y a plus d'eau libre et au-dessus, il n'y a plus d'eau liée. Pour éliminer cette dernière, il faut un apport d'énergie équivalent à l'énergie de sorption. L'eau de constitution fait partie des molécules de la fraction organique du bois. Elle persiste à l'état anhydre et n'est évacuée qu'avec un traitement soit chimique ou biologique soit thermique. Il est admis que le PSF est de l'ordre de 30 % [44].

I.1.3. Propriétés physiques du bois

I.1.3.1. Teneur en humidité

Le bois est matériau hygroscopique. En d'autres termes, il absorbe et désorbe l'humidité, pour une température et pression données, du milieu où il se trouve jusqu'à atteindre un équilibre hygroscopique. Le degré d'humidité ou la teneur en eau est la masse d'eau contenue dans le bois et rapportée à la masse anhydre du bois :

$$H\% = \frac{M - M_0}{M_0} * 100 \quad (1)$$

Avec :

M et M₀, les masses du bois à une certaine humidité interne et anhydre respectivement.

Le taux d'humidité à l'état frais varie d'une essence à l'autre et peut même dépasser les 200 % pour certaines essences [45]. L'état du bois suivant son taux d'humidité est présenté dans le tableau 2.

Tableau.2 Etat du bois suivant son taux d'humidité [46].

Etat du bois	Humidité du bois	
Bois imbibé	70 à 150 % est plus	Bois immergé dans l'eau
Bois vert	30 à 70 % est plus	Bois sur pied ou sur coupe
Bois mi- sec	23 à 29 %	Le bois débité atteint assez vite ces humidités par séjour à l'air.
Bois commercialement sec	18 à 22 %	
Bois sec à l'air (à l'abri de la pluie)	17 %	Hiver en Europe.
	15 %	Humidité normale en France.
Bois très sec	13 %	Eté en Europe.
	8 à 12 %	Atmosphère très sèche. Local chauffé.
Bois anhydre	0 %	Etuve à 103°. Etat instable.

I.1.3.2. Point de saturation des fibres (PSF)

Comme il a déjà été précisé au paragraphe I.1.2.4.6., le point de saturation des fibres noté PSF correspond au taux d'humidité du bois saturé en eau liée. En dessous de ce point, le bois subit des variations dimensionnelles. En effet, lorsque l'eau libre disparaît et qu'il ne reste plus dans les membranes du bois que de l'eau liée, le bois atteint son PSF [47].

La détermination du PSF se fait habituellement sur des éprouvettes cubiques de 20 mm d'arêtes à différents états d'humidité :

- L'état saturé : atteint lorsque les éprouvettes mises dans un bain d'eau n'absorbent plus l'eau, c'est-à-dire, leurs masses deviennent presque constantes entre deux pesées à 4 heures d'intervalle.

- L'état anhydre : atteint quand les éprouvettes mises dans une étuve à 103 °C ne perdent plus d'eau.

- L'état d'humidité H.

Le PSF est estimé par la formule suivante :

$$Psf = \frac{V_s - V_0}{V_H - V_0} * H \% \quad (2)$$

Avec :

V_s , V_0 et V_h : Volumes de l'éprouvette aux états saturé, anhydre et humide.

I.1.3.3. Variations dimensionnelles du bois

La variation des dimensions du bois est la réponse à une variation de l'humidité et plus précisément lorsque celle-ci est en-deçà du PSF comme il a été précisé au paragraphe précédent. Du PSF au bois anhydre, les trois directions du bois subissent un retrait. Compte tenu du caractère anisotrope du bois, le retrait longitudinal est plus faible que le retrait radial lequel est plus faible que le retrait tangentiel. Le tableau 3 présente la classification du retrait volumétrique total du plus fort au plus faible.

Tableau. 3 Rétractibilité volumétrique totale en % [46].

Catégorie	Retrait volumétrique total	Type de comparaison
Fort retrait	20 à 15 %	Grumes à grandes fentes de dessiccation, à débiter avant séchage (Charme, Frêne, Chêne, Palétuvier, ...).
Moyen retrait	15 à 10 %	Grumes à moyennes fentes, pouvant être conservées en boisronds, étais de mine, poteaux, perches d'échafaudage (Résineux, Robinier, Acajou d'Afrique, Okoumé, Limbo, ...).
Faible retrait	10 à 5 %	Grumes à petites fentes pouvant sécher avant débit. Déroulage, modelage (Noyer, Peuplier, Ayoux, Bossé, ...).

I.1.3.4. Coefficient de rétractabilité (α_v)

Le coefficient de rétractabilité α_v représente le retrait du bois relatif à une perte de 1 % de la teneur en humidité en dessous du PSF [48]. Il permet de caractériser les variations du volume au voisinage d'une humidité H. Il est exprimé en % et en % de H, par la formule ci-dessous :

$$\alpha_v = \frac{V_S - V_0}{V_0 * H} * 100 \quad (3)$$

L'expérience montre la relation d'ordre suivante pour toutes les essences : $\alpha_T \geq \alpha_R \gg \alpha_L$ [48].

Avec : α_T , α_R , α_L : Coefficient de retrait tangentiel, Radial, longitudinal, respectivement.

Le tableau 4 présente la classification du coefficient du retrait volumétrique total du bois très nerveux au bois peu nerveux.

Tableau. 4 Coefficient de rétractabilité volumétrique totale en % [46].

Catégorie	Coefficient de rétractabilité	Type de comparaison
Bois très nerveux	1 à 0,75 %	Bois se déformant beaucoup sous l'influence des variations d'humidité. A employer dans des milieux à humidité constante. Certains Hêtres, Eucalyptus, certains Tali, Palétuviers.
	0,75 à 0,55 %	Bois à débiter sur maille. Chêne dur, Charme, Robinier, Bilinga, Niové.
Bois moyennement nerveux	0,55 à 0,35 %	Bois de service et de construction.
Bois peu nerveux	0,35 à 0,15 %	Bois de menuiserie, ébénisterie, tournerie, sculpture. Noyer foncé, Chêne, Frêne et Hêtre tendre, bois blanc, y compris les résineux, Teck, Beng.

I.1.3.5. Densité et infra-densité

La densité est la quantité de la matière ligneuse contenue dans un volume de bois pour un taux d'humidité donné. Généralement, la densité est estimée à un taux d'humidité de 12 %.

La seule estimation faisant intervenir des paramètres mesurés avec une précision satisfaisante est l'infra-densité. Cette dernière est le rapport entre la masse du bois anhydre, après son séchage à 103 °C, et son volume saturé mesuré selon le principe d'Archimède.

La densité et l'infra-densité du bois dépendent fortement du type de bois, de l'espèce et de la partie de l'arbre considérée. En effet, la densité des feuillus est plus élevée que celle des résineux [49]. D'après El Abid, l'infra-densité du pin maritime marocain est de l'ordre de 0,38 g/cm³ contre 0,45 g/cm³ pour le pin d'Alep [50]. Enfin, l'alternance Bois printemps / Bois d'été à l'intérieur d'un cerne annuel provoque une grande hétérogénéité de la densité et de l'infra-densité dans la direction radiale.

I.1.4. Propriétés mécaniques du bois

En raison de son anatomie particulière, le matériau bois manifeste une grande variété de comportements selon l'état de contraintes auquel il est soumis. Nous précisons dans ce qui suit le comportement orthotrope du bois qui est un cas particulier d'anisotropie.

I.1.4.1. Anisotropie et orthotropie du bois

Le bois est un matériau orienté. En effet, comme nous l'avons déjà indiqué lors de la description des bois résineux, les trachéides sont orientées selon l'axe du tronc et assurent le soutien mécanique et la conduction de la sève. Les parenchymes, tissus de réserves. Cette organisation cellulaire fait que le bois est caractérisé par ses trois directions naturelles d'anisotropie qui sont orthogonales entre elles :

- Longitudinale L, axe des fibres,
- Radiale R, perpendiculaire aux cernes,
- Tangentielle T, direction tangente aux cernes de croissance,

Par rapport à l'axe longitudinal, trois plans de symétrie ou d'orthotropie se distinguent : radial LR, tangentiel LT et transversal RT (figure 8).

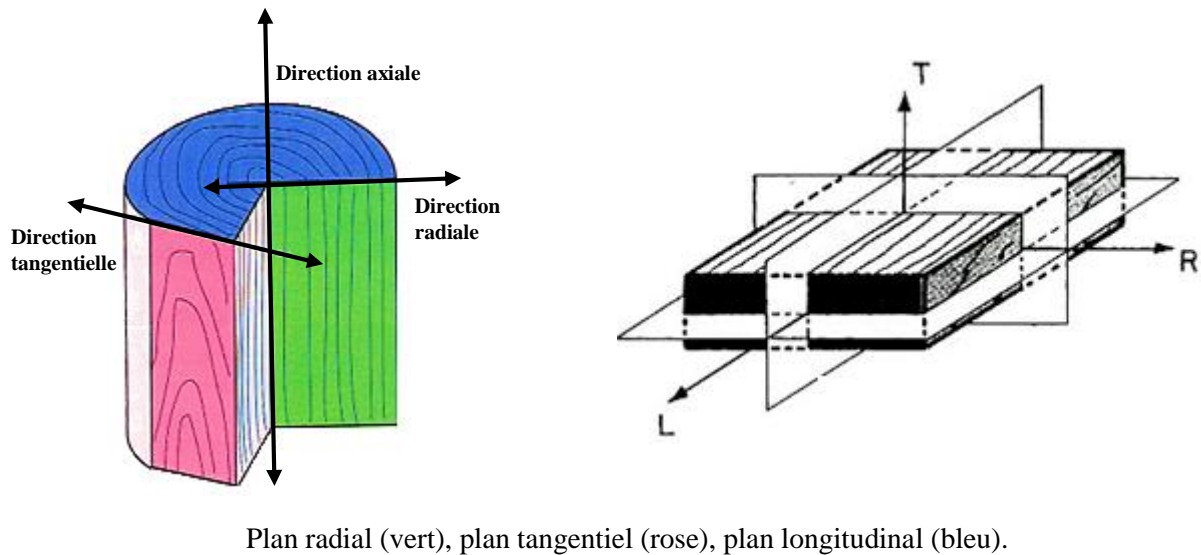


Fig.8. Directions principales et plans ligneux du bois à droite, plans de symétrie ou d'orthotropie à gauche.

I.1.4.2. Comportement élastique du bois

Comme il est déjà précisé, le bois possède trois directions principales et trois plans de symétrie orthogonaux entre eux. Son comportement élastique, cas des petites déformations, est de ce fait décrit par un tenseur contrainte-déformation d'ordre 3. Dans le domaine d'élasticité linéaire orthotrope, la contrainte élastique σ est reliée à la déformation ξ par la loi de Hooke généralisée ou par son inverse dont les expressions respectives sont :

$$\sigma_j = C_{ij}\xi_j \quad \text{et} \quad \xi_i = S_{ij}\sigma_j \quad (4)$$

Avec : C_{ij} et S_{ij} les matrices de rigidité et de souplesse respectivement.

En élasticité linéaire, ce tenseur est généralement noté sous forme matricielle dans laquelle chaque composante peut être exprimée en fonctions de grandeurs techniques notamment le module d'élasticité, le module de cisaillement et le coefficient de Poisson. En effet, un matériau orthotrope, générant trois plans de symétries, est caractérisé par 12 coefficients :

- 3 modules d'élasticité ou modules d'Young E_R ; E_L et E_T ;
- 3 modules de cisaillement G_{TL} ; G_{LR} et G_{RT} ;
- 6 coefficients de Poisson ν_{TR} ; ν_{TL} ; ν_{RL} ; ν_{RT} ; ν_{LT} et ν_{LR} .

Le tenseur des souplesses élastiques exprimé dans le repère local d'anisotropie RTL s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} \xi_{RR} \\ \xi_{TT} \\ \xi_{LL} \\ 2\xi_{TL} \\ 2\xi_{LR} \\ 2\xi_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \vdots & & \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_L} & \frac{1}{E_L} & 0 & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & \ddots & \\ \vdots & & & \ddots & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & & \dots & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{RR} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{LL} \\ \sigma_{TL} \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{RT} \end{bmatrix}$$

La structure de la matrice est symétrique, il en découle les égalités suivantes :

$$\frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_T}, \quad \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}, \quad \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}$$

D'après Guitard [33], les valeurs du module d'élasticité $E_L \gg E_R > E_T$. Ce classement, reflétant l'anisotropie du bois comme il a déjà été mentionné précédemment, trouve son origine dans l'agencement cellulaire. Le soutien mécanique étant assuré par les fibres dans le sens longitudinal fait que le module d'élasticité est plus élevé que dans les deux sens perpendiculaires. Le module d'élasticité radial est plus élevé que celui dans le sens tangentiel car les rayons ligneux assurent le soutien mécanique dans le sens radial [51,49].

I.1.4.3. Comportement à la rupture du bois

Comme c'est le cas dans le domaine élastique, le comportement à la rupture du bois dépend également de la direction où le matériau est sollicité. Ainsi, en dehors de la zone élastique, le bois sollicité en compression axiale possède un comportement ductile aussi bien dans le sens parallèle aux fibres que perpendiculaire [52]. La courbe à la traction, force-déplacement, met en évidence une chute brutale et importante de la résistance du matériau, caractéristique d'un comportement fragile [53] (figure 9).

Les mécanismes impliqués dans la réponse du matériau aux sollicitations mécaniques auxquelles il est soumis, trouvent leur origine aux niveaux aussi bien des liaisons atomiques, des cellules que des fibres. A l'échelle atomique, les déformations résultent de la rupture des liaisons et des empilements atomiques [54]. Au niveau cellulaire et en compression parallèle au fil, le mécanisme de rupture se fait par localisation des déformations dans une bande de cisaillement. La bande de cisaillement est initiée à cause de la présence des cellules radiales du bois qui provoquent localement des perturbations dans l'alignement des cellules longitudinales du bois et initient un micro-flambement de ces dernières localisées dans une bande inclinée.

En flexion, les fibres comprimées les plus chargées sont soutenues par les fibres les moins chargées. En dépassant la limite élastique, les premières fibres à atteindre la limite de rupture sont les fibres comprimées extrêmes. En revanche, cela ne provoque pas forcément la rupture de l'éprouvette car les fibres les moins chargées prennent le relais. Dans cette étape, il apparaît un effet de flambage dans le bois. L'augmentation de la charge amène l'apparition de contraintes de rupture vers l'intérieur de l'éprouvette ce qui engendre le déplacement de la fibre. La rupture ne survient que lorsque les fibres tendues atteignent leur propre contrainte de rupture [55-59].

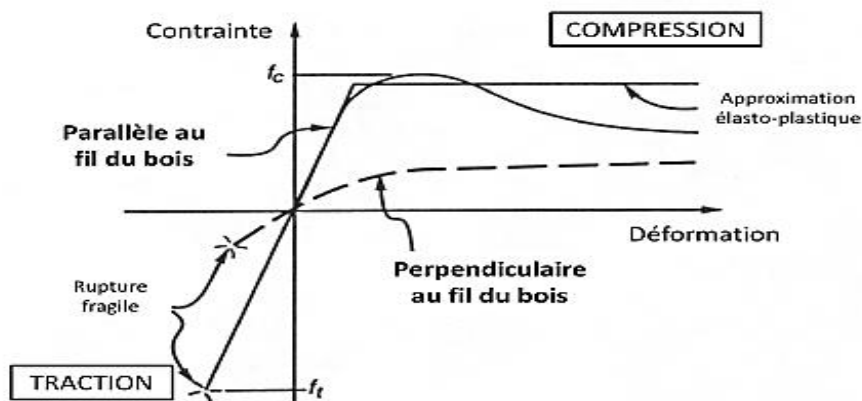


Fig.9. Courbe contrainte-déformation en traction et en compression dans la direction axiale et transverse du bois.

I.1.4.4. Propriétés acoustiques et vibratoires du bois

L'émission acoustique est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires, résultant de micro-déplacements locaux internes au sein

d'un matériau soumis à une sollicitation statique ou dynamique (norme AFNOR NF A09-350). La technique de l'émission acoustique consiste donc à détecter ces ondes élastiques afin de récupérer des informations en temps réel sur le comportement mécanique du matériau [60,61].

En effet, les propriétés acoustiques du bois se rapportent à l'utilisation du son pour la prédiction des modules d'élasticité du bois à partir des mesures non-destructives ou à l'utilisation du bois comme instruments de musique ou composantes d'instruments de musique (xylophones, violons, guitares, pianos, ...) [62]. Le son se répand dans un milieu élastique sous forme d'ondes de compression (longitudinales) dont la vitesse de transmission est en fonction de l'espèce, de la dimension d'éprouvettes et de la méthode utilisée pour sa détermination [63-66]. La vitesse de propagation d'une onde longitudinale dans une tige mince de longueur finie dépend de la masse volumique et de la constante d'élasticité. Elle s'estime comme étant égale à $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$.

I.2. Polymères synthétiques pétrosourcés

Les polymères synthétiques pétrosourcés ou résines de synthèse sont des matériaux organiques ou encore des macromolécules composées de plusieurs monomères. Ces derniers sont couplés les uns aux autres par polymérisation. Ils ont des caractéristiques mécaniques, physiques, ou même électriques optimisées lors de leur élaboration pour répondre aux exigences de l'usage auquel ils sont destinés. Ils sont de plus en plus employés dans de nombreux matériaux composites notamment bois-polymères. Les polymères synthétiques qui ont fait leur preuve dans ce contexte sont les thermoplastiques et les thermodurcissables. Ces deux catégories diffèrent principalement par leur comportement vis-à-vis de la chaleur, chaque catégorie ayant par ailleurs ses avantages et ses inconvénients. Le caractère recyclable des thermoplastiques est l'une des raisons qui a orienté notre choix vers ces résines comme il a déjà été précisé dans l'introduction de ce mémoire. Nous présentons ainsi dans les paragraphes qui suivent la description, les caractéristiques mécaniques et thermiques et les procédés de fabrication des thermoplastiques.

I.2.1. Polymères thermoplastiques

Les macromolécules des résines thermoplastiques sont constituées à l'échelle atomique de carbone, d'hydrogène, voire d'oxygène de même que d'autres atomes. Elles sont organisées, à l'échelle moléculaire, en chaînes linéaires faiblement liées entre elles latéralement ce qui facilite leur mouvement sous l'effet de la chaleur. Ces résines fondent d'ailleurs de manière réversible entre 100 et 200 °C, propriété favorable à leur mise en forme. Cette propriété perdure sur plusieurs cycles de chauffage et de refroidissement, sans que leur composition chimique n'en soit pour autant modifiée, ce qui est en faveur de leur recyclage. Les thermoplastiques ont des masses moléculaires élevées et peuvent être amorphes ou semi-cristallins ce qui correspond respectivement à des aspects transparent et translucide de leur matière. Les thermoplastiques sont généralement synthétisés par polymérisations radicalaire et coordinative. L'ajout d'adjuvants et éventuellement de renforts permet d'adapter la résine à un usage particulier.

Ces matériaux sont mis en œuvre par des techniques de moulage dont, entre autres, la compression, l'extrusion, le thermoformage. En tenant compte de leur domaine d'utilisation en température, de leur coût et de leur volume de production, les résines thermoplastiques sont classées en trois catégories. Une de ces dernières est relative au 'big six', la deuxième aux polymères d'ingénierie et la troisième aux polymères de spécialité. Le 'big six' regroupe les polymères les plus économiques, les plus produits, les plus consommés et les plus commodes : les polyoléfines comme le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP), les polystyréniques et les polyvinyliques comme respectivement PS et PVC. Les technos polymères, les polyamides, possèdent une bonne résistance à la chaleur, aux agressions chimiques et de bonnes caractéristiques mécaniques. Quant aux polymères de spécialités, ils se distinguent par leur prix et leur propriété électrique élevée et leur résistance à la chaleur. Les résines fluorées ou fluor polymères, le téflon PTFE à titre d'exemple, ont une longue durée de vie, présentent une bonne stabilité thermique et résistent pratiquement à tous les agents chimiques. Dans ce qui suit, nous donnons quelques caractéristiques mécaniques et thermiques des thermoplastiques de la catégorie des 'big Six' et plus particulièrement à celles du polypropylène (PP) et du polyéthylène haute densité (PEHD) retenus dans notre travail pour élaborer les composites bois-polymères.

I.2.2. Caractéristiques du polypropylène (PP) et du polyéthylène haute densité (PEHD)

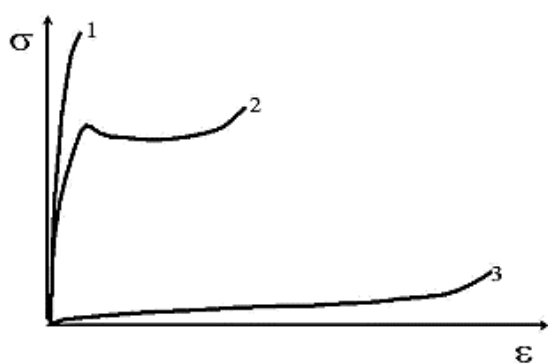
Le PP et le PEHD sont des polymères thermoplastiques de commodité et font partie des polyoléfines. Quelques données relatives à leurs caractéristiques sont indiquées dans le tableau 5.

Le PP et le PEHD sont semi-cristallins. Ils ont un ordonnancement partiel de leurs molécules. Ils présentent ainsi des zones cristallines et des zones amorphes respectivement nommées cristallites et sphérolites. Leurs propriétés mécaniques, résultant de la combinaison des propriétés des zones amorphes et cristallines, dépendent du taux de cristallinité. En effet, les zones cristallines confèrent au polymère sa rigidité mais il devient fragile si leur proportion est élevée alors que les zones amorphes

apportent une certaine élasticité et résistance aux chocs. Le module d'élasticité des polymères semi-cristallins ne change qu'à température supérieure ou égale à leur point de fusion. Leurs propriétés thermiques dépendent également du taux de cristallinité. Le taux de ce dernier est à l'origine du degré de ramollissement du polymère qui pour des polymères semi-cristallins est bien au-dessus de la température de transition vitreuse. Quant à leur fusion, elle se fait sur un intervalle étroit activant la fluidisation rapide du polymère.

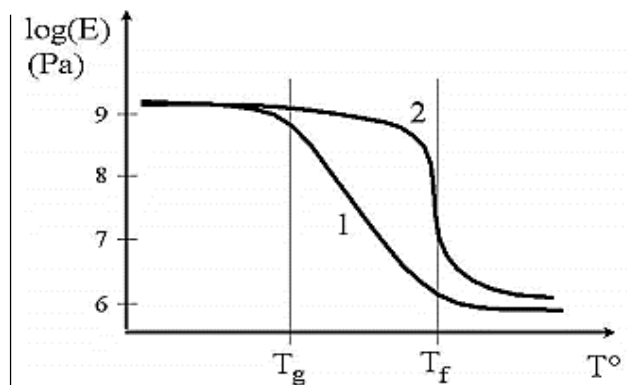
Tableau. 5 Données relatives aux caractéristiques du PP et du PEHD [67].

Monomère de base	Propylène	Éthylène
Formule brute	$(C_3H_6)_n$	$(C_2H_4)_n$
Formule chimique	$(-CH_2-CH(CH_3)-)_n$	$(-CH_2-CH_2)_n$
Tg et Tf	-10°C et 145 à 175°C	-110°C et 85 à 140°C
T maximale d'exploitation	90 à 120°C	55 à 120°C
T minimale d'exploitation	-10 à -60°C	Température de fragilisation -50°C
Conductivité thermique à 23°C	0,1 à 0,22 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0,46 à 0,51 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Masse volumique	0,9 g/cm ³	0,91 à 0,96 g/cm ³
Cristallinité	-	60 à 80 %
Contrainte à la rupture	-	26 à 40 MPa



Tracés contrainte-déformation typiques en traction.

- 1 : polymère fragile $T < T_g$
- 2 : polymère ductile $T > T_g$
- 3 : élastomère $T > T_g$



Tracés module d'Young en fonction de la température.

- 1 : polymère amorphe
- 2 : polymère semi-cristallin

Fig.10. (a) : Tracés contraintes-déformations des polymères en traction ; (b) : Evolutions typiques du module d'Young avec la température des thermoplastiques.

I.2.3. Effets de l'eau sur les polymères

Les polymères, selon leurs utilisations, peuvent être exposés à un fluide aqueux ou à une ambiance humide et ce serait la durée d'exposition ou de contact polymère-eau qui affecterait les propriétés du polymère.

Les thermoplastiques ne sont pas solubles dans l'eau et n'aurait pas d'affinité pour l'eau car ils sont hydrophobes [3]. Cela dit, le PE et le PP peuvent tout de même en absorber environ 0,2 % en masse. Cette quantité d'eau, même si elle est faible, est révélatrice d'une discontinuité de la structure du polymère. En effet, il est admis que les polymères présentent des défauts dans leur structure, inhérents à leur élaboration, et qui peuvent être sièges de leur faiblesse. Ces défauts, plutôt désignés par 'volumes libres' dans l'approche volumétrique [68, 69], seraient essentiellement présents dans la phase amorphe du polymère. La quantité et la taille du volume libre conditionneraient la quantité d'eau absorbée et sa diffusion dans le polymère. L'approche moléculaire se base sur le caractère hydrophile du matériau autrement dit sur l'existence de sites polaires qui formeraient des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau.

Le moyen macroscopique le plus connu pour évaluer la teneur en eau ou l'humidité d'un polymère est la gravimétrie. Ce moyen ne renseigne pas sur la nature de l'eau présente dans le polymère ni sur les liaisons eau-polymère. En effet, dans les polymères, l'eau y est présente, d'après la littérature [70, 71, 72], sous formes libre, faiblement ou fortement liées par des liaisons hydrogène. L'eau libre ne réagirait pas avec le polymère alors que l'eau fortement liée influencerait les propriétés mécaniques. Les différents états de l'eau précités peuvent être mis en évidence par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier FTIR. Ainsi, la vibration O-H relative à l'eau liée serait située à 3200 cm^{-1} , celle de l'eau faiblement liée à 3600 cm^{-1} [70, 71, 72]. Cette dernière est également attribuée à la vibration OH de l'eau libre [73, 74, 75, 76, 77]. Kusanagi et Yukawa ont mis en évidence par analyse FTIR l'existence de l'eau aux états gazeux et liquide dans les polymères hydrophobes [78]. *Obéid et all.* [79] ont noté que les premières molécules d'eau absorbées par une zone sèche du polymère occuperaient les sites les plus hydrophiles du matériau et se fixeraient sur une seule chaîne ou formeraient des ponts entre deux chaînes. Les molécules d'eau seraient ainsi simplement

ou doublement liées aux chaînes du matériau [80]. Les auteurs précités ajoutent que si les sites hydrophiles du matériau sont partiellement occupés par l'eau, la plastification pourrait se produire sans gonflement du matériau ce qui n'est pas le cas lorsque l'eau occupe la totalité des sites hydrophiles. Les variations dimensionnelles des polymères ont également été reportées par *Monson et al.* [81].

Dans leurs travaux relatifs à l'effet de l'immersion des polyamides dans l'eau sur leur comportement mécanique, *Guerira et al.* [82] ont montré que l'absorption d'eau par le matériau suit la loi de Fick. De plus, pour une durée d'immersion allant de 4 à 28 jours, le module d'élasticité, la contrainte et la déformation à la rupture baissent respectivement de 68, 50 et 6 %. D'autres travaux ont également observé que les propriétés mécaniques telles que le module de Young (*Nielsen et al.*, 2000 [80]; *Yakimets et al.*, 2007 [83]), ou encore les résistances mécaniques (*Selzer et al.*, 1997 [84]; *Hassan et al.*, 2012 [85]) diminuent avec l'absorption d'eau par le polymère. Une diminution de la température de transition vitreuse du polymère toujours par l'absorption de l'eau a aussi été observée (*Kaimin et al.*, 1971 [86]). La pénétration de l'eau dans le polymère aurait, d'après les auteurs précités, brisé les liaisons latérales entre les macromolécules de la structure. Les macromolécules auraient ensuite établi des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau ce qui est en faveur d'une mobilité des macromolécules, la conséquence en est la dégradation des propriétés mécaniques du matériau. Autrement dit, le polymère aurait subi une hydrolyse, qui est en fait une dépolymérisation, lente certes mais irréversible.

Quant aux échanges d'humidité, des travaux de la littérature ont mis en évidence les échanges entre l'eau et les polymères thermoplastiques par les mesures d'adsorption/désorption.

I.3. Composites bois-polymère (CBP)

De tout temps, des matériaux de nature et d'origine diverses ont été utilisés pour répondre aux besoins des anciennes comme des nouvelles civilisations. Les premières civilisations se sont servies des formes naturelles des matériaux qui étaient à leur disposition notamment la pierre et le bois. En revanche, l'évolution des civilisations, le progrès et l'innovation ont débouché sur l'emploi de matériaux synthétiques combinés ou pas aux matériaux naturels. La combinaison entre au moins deux matériaux de même origine ou d'origine différentes améliore les propriétés des matériaux pris séparément et constitue ce qui est communément appelé un composite. Ce dernier n'est pas une invention des civilisations modernes mais une conception très ancienne, les briques d'argile renforcées de paille en sont le plus ancien exemple et le béton armé un des plus récents. Les avancées dans le domaine des composites, aussi bien aux échelles macroscopique que nanoscopique, sont spectaculaires et leur développement et leur application dans divers domaines. Ces avancées, remises en question par les problèmes associés à l'emploi des polymères synthétiques pétrosourcés dans les composites, écologie et respects de l'environnement obligent, visent l'élaboration de composites verts dont tous les composants seront biosourcés. Les fibres naturelles, autant que leur contenu dans le composite permettent qu'il soit élevé et autant qu'elles proviennent de déchets de culture et pas de cultures de valeur, offrent une réponse adéquate à cette clairvoyance. Il n'empêche que les fibres naturelles, autant leurs avantages par rapport aux fibres conventionnelles sont indéniables, autant leurs inconvénients limitent encore leur emploi à grande échelle, à moins qu'elles soient traitées, par des moyens surtout chimiques, moins physiques et de plus en plus enzymatiques. La portée de ces traitements peut potentialiser les avantages de ces fibres pour atteindre l'efficacité et la durabilité souhaitées pour les composites mais ce n'est pas sans conséquence sur l'environnement.

Dans ce qui suit, nous présentons les constituants des composites, leur architecture, leur propriété, leur méthode d'élaboration, les avantages et inconvénients de leurs composants de base essentiellement pour les composites à base de fibres végétales et de polymères thermoplastiques pétrosourcés.

I.3.1. Composition, architecture et particularités des composites (CBP)

Structurellement, un composite est microscopiquement constitué d'au moins deux phases aux caractéristiques complémentaires lui conférant macroscopiquement des propriétés dont ne disposent pas les phases prises séparément. L'une des phases assure le rôle de renfort et l'autre celui de matrice ou liant. L'effort mécanique est pris en charge par le renfort alors que la matrice doit assumer, en plus de son rôle de liant des renforts, la répartition de la charge mécanique lors de sollicitations ultérieure et la protection des renforts du milieu extérieur. La complémentarité entre ces deux phases réside dans le fait que la matrice est une phase continue, autrement dit homogène et isotrope, peu rigide et peu résistante alors que le renfort est plutôt discontinu, rigide et résistant. L'assemblage entre ces deux phases complémentaires devrait procurer une solidarisation au composite. Si tel n'est pas le cas, une troisième phase supplémentaire, appelée interface, est ajoutée entre les phases précédemment citées pour apporter la consolidation souhaitée.

Les propriétés acquises par le composite sont tributaires des propriétés de ses constituants de base, de leur proportion relative volumique ou massique, de la géométrie et de la distribution du renfort et de la nature des interactions interface matrice-renfort.

Le renfort, de forme fibreuse, est d'origine soit conventionnelle soit naturelle. Parmi les différentes matrices existantes, la matrice organique est la plus adoptée. Les deux premières parties de ce chapitre ont été réservées à l'anatomie, la structure, la composition et les propriétés du bois et à la synthèse, la classification et les propriétés des thermoplastiques. Un complément d'informations relatives aux renforts végétaux et aux matrices organiques thermoplastiques sont proposées dans les paragraphes ci-après.

I.3.2. Renforts végétaux

La référence pour les renforts végétaux est le bois. La description de la composition et de la structure de ce dernier est détaillée dans la première partie de ce chapitre.

Les caractères renouvelable, écologique et de disponibilité des fibres végétales sont des atouts considérables. A cela, s'ajoutent leur faible densité, en faveur de la réduction des poids des composites, et leurs caractéristiques mécaniques et thermiques compétitives comparativement aux fibres conventionnelles, fibres de carbone, fibres de verre, fibres d'aramide,..., qui sont non recyclables, avec un faible facteur d'amortissement, un coup élevé, et présentant des comportements élastiques fragiles [87, 88].

Les inconvénients à pallier pour tirer profit des atouts précités sont la sensibilité des fibres végétales aussi bien à l'humidité qu'à la température [89]. En effet, les pertes et reprises d'humidité peuvent provoquer une instabilité dimensionnelle et par voie de conséquence une réduction des propriétés mécaniques des fibres végétales. Ces dernières peuvent de même perdre leur intégrité à certains niveaux de sollicitation thermique, il est alors impératif d'élaborer les bio-composites en deçà de ces niveaux.

Les renforts végétaux sont utilisés sous forme de particules, de fibres courtes ou longues [90]. Les composites à renfort végétal particulaire ou à fibres courtes sont des matériaux isotropes alors que les composites renforcés avec des fibres longues sont plutôt anisotropes [91].

Par ailleurs, le type d'essence, résineux ou feuillu, se distingue d'une importante variation du type et de la quantité d'extractible, qui engendre une variation des propriétés du composite CBP, à cela s'ajoute la proportion et la nature des fibres, feuilles, écorces, branches, fibres recyclées [92-94].

I.3.3. Matrice organique

Quelques informations relatives à la synthèse, la structure et les propriétés des thermoplastiques sont précisées dans la deuxième partie de ce chapitre. Précisons tout de même que ces résines sont très utilisées notamment en raison de leur caractère recyclable. Elles sont ainsi davantage employées à l'état recyclé qu'à l'état vierge dans l'élaboration des composites, démarche motivée par le caractère écologique et l'intérêt économique. Les conditions opératoires du recyclage ont une incidence sur la qualité du

produit final et sur ses propriétés notamment la cristallinité [95]. Ceci étant, les propriétés mécaniques des composites à base de polymères recyclés ne semblent subir de chute manifeste [95,96].

I.3.4. Interface, adhésion dans les composites (CBP)

Le renfort végétal et la matrice organique sont respectivement hydrophiles et hydrophobes. Leur association au sein du composite présente une incompatibilité essentiellement liée au renfort. En effet, la sensibilité des fibres végétales à l'humidité a une incidence sur l'adhésion et sur les propriétés physiques et mécaniques des composites.

Par ailleurs, l'adhésion matrice/renfort est tributaire de la nature de la surface du renfort végétal. En effet, la fraction organique de ce dernier est constituée de substances cellulosiques pourvues de groupements hydroxyles, ceux des zones amorphes étant les plus accessibles à l'adhésion avec la matrice contrairement à ceux des zones cristallines. Comme les zones amorphes sont moins importantes que les zones cristallines, l'adhésion fibres végétale/matrice serait insuffisante.

Les moyens mis en œuvre pour pallier les inconvénients précités passent par l'ajout d'additifs ou par le traitement des fibres végétales.

I.3.5. Additifs dans les composites (CBP)

Les additifs sont des substances minérales ou des réactifs chimiques additionnés aux constituants de base des composites. Leur ajout permet d'améliorer les liaisons renfort/matrice, modifier l'aspect du produit final ou ses propriétés physicochimiques pour des utilisations spécifiques.

Les additifs se présentent sous forme de colorants (pigments minéraux, végétaux ou synthétiques), des tensioactifs, des dispersants (soude), des épaississants (bore, alginate, polyvinyle alcool, ...), des plastifiants (eau, polyol, glycérine, ...), des émulsifiants (acétate de polyvinyle), des agents de texture (sorbitol, talc, glycérine, cire, urée, ...), des agents réticulant (acétone, formaldéhyde, etc.), des agents compatibilisant

(isocyanates, phénol, soude, ...), des agents antifongiques ou antimicrobiens (bénomyl, formol, phénol, bentonites, tétrahydruroborate de sodium: NaBH_4 ,...),... [97-99].

Dans l'industrie des CBP, l'emploi des additifs sous forme de lubrifiants et d'agents de couplage favorisent l'adhésion des fibres de bois (hydrophiles) et plastiques (hydrophobes) et améliorent les caractéristiques d'écoulement interne du polymère, tout en augmentant les propriétés de mouillage des composants [100,101].

Des travaux réalisés sur le type de l'agent de couplage ou sur son pourcentage dans les CBP ont montré que les agents organiques génèrent une meilleure adhésion que les agents inorganiques. D'une manière générale, il est possible d'améliorer la résistance à l'impact grâce à une grande quantité d'additifs (10 %) [100]. D'autre part, la variation du pourcentage d'additifs notamment le talc dans des proportions allant de 3 à 9 % du CBP influence les propriétés mécaniques du composite aussi bien sa résistance, son module à la traction que son module de flexion. Il en est de même pour sa stabilité dimensionnelle en termes d'absorption d'eau et du gonflement, caractéristiques déterminant l'adaptation des CBP aux différentes conditions environnementales [102].

I.3.6. Proportions des constituants

La charge ou le renfort d'un matériau composite est une substance relativement inerte ajoutée à certains plastiques en proportion variant de 5 à 60 %. Certains renforts sont ajoutés au polymère synthétique pour réduire le coût de revient.

Les propriétés mécaniques des composites vont de pair avec le contenu en renfort. Ce qui est le cas pour les CBP. En effet, lorsque le pourcentage de renfort en l'occurrence les fibres de bois augmente, les propriétés mécaniques et physiques sont améliorées. Les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) en flexion et en traction augmentent lorsque le contenu en fibres passe de 20 % à 30 % dans les CBP [103]. D'après la même étude, les particules ou les fibres de faibles dimensions peuvent être considérées comme charges et améliorent ainsi la résistance en traction surtout pour les composites à base de polypropylène et de fibres de bois.

L'augmentation de la proportion de fibres lignocellulosiques a aussi pour conséquence directe la multiplication des problèmes liés à l'usage d'un matériau biologique hygroscopique et putrescible. Les propriétés d'élongation et la résistance à l'impact sont diminuées par l'accroissement de la quantité de bois [104]. Néanmoins, il existe des composites contenant jusqu'à 95 % de bois et qui ont de bonnes performances comme le cas des matelas consolidés [104]. D'autre part, la proportion de polymère synthétique joue aussi un rôle au même titre que la proportion de bois, de même que leurs propriétés. En effet, ces dernières sont variables, et par conséquent, la matrice n'apporte pas les mêmes performances, qu'il s'agisse de polyéthylène haute densité, basse densité, de polypropylène rigide ou souple ou de PVC, ... [104].

I.3.7. Morphologie, dispersion et orientation des fibres

La morphologie, la dispersion et l'orientation des fibres ont une incidence sur toutes les propriétés des CBP. La comparaison entre les différentes formes de bois utilisées : farines, particules, fibres, ..., a montré que les fibres se comportent comme des charges pour des facteurs de forme faible, alors que les fibres à fort facteur de forme permettent un meilleur usage de leurs bonnes caractéristiques mécaniques [105]. Les fibres de petites dimensions sont plus faciles à disperser dans la matrice organique que les fibres longues [106,107]. Par ailleurs, l'utilisation des fibres à la place de la farine de bois a plusieurs avantages comme :

- Un renforcement et une rigidité plus efficaces.
- Un matériau plus résistant avec un taux de fluage plus réduit [108].

La plupart des fibres qui ont l'avantage spécifique d'être longues et minces (telles que les fibres à papier) agissent comme un renfort et permettent une augmentation des MOE si elles sont adéquatement orientées. De plus, la résistance et la rigidité sont améliorées en augmentant la longueur des fibres si [107,109] :

- Il y a une bonne adhésion entre les fibres de bois et la matrice plastique.
- Les fibres sont uniformément dispersées dans la matrice.
- Les fibres sont adéquatement orientées.

Les particules de bois de petites dimensions sont typiquement utilisées comme fibres de remplissage et causent souvent une concentration des contraintes avec une diminution de la force du matériau obtenu. Par ailleurs, des études ont montré que de petites particules bien dispersées augmentent généralement les propriétés de résistance [110].

Par ailleurs, une corrélation existe entre le procédé d'extrusion et la longueur des fibres puisque la longueur finale des fibres dans le CBP dépend des paramètres d'extrusion. En effet, un temps de mélange prolongé et une vitesse élevée de l'extrudeuse brisent les fibres et augmentent leur dispersion des fibres dans la matrice [106]. De plus, les fibres doivent être orientées dans le sens de l'extrusion ou de l'écoulement pour obtenir de bonnes propriétés mécaniques et une rigidité satisfaisante [107]. Par la suite, les fibres, réparties aléatoirement ou mal réparties, contribuent à la diminution de la rigidité des composites. Dans ce cas, les produits obtenus se dégradent plus facilement à cause de la grande concentration des contraintes à des endroits différents du matériau.

I.3.8. Humidité

L'utilisation des CBP est limitée par ce paramètre. Le caractère hydrophile des fibres de bois provoque plusieurs effets au niveau de l'adhésion ce qui diminue les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau [111-113]. En effet, l'humidité influence fortement l'adhésion entre fibres de bois et matrice causant une perte de rigidité, et parfois la dégradation des fibres. Cela dépend fortement du pourcentage des fibres dans la matrice polymère [3].

En comparant l'absorption d'humidité des CBP à celle du bois massif [98], a noté que les CBP, conçus par différents procédés de fabrication, absorbent moins l'humidité et moins rapidement que le bois massif. Ils ont, d'outre, une meilleure résistance à la pourriture et aux attaques de champignons.

I.3.9. Stabilité thermique

Les fibres végétales sont sensibles à la chaleur. La cellulose se dégrade au-dessus de 250°C, mais la lignine se dégrade très significativement dès 180 °C. De plus, des décolorations et des pertes de masse sont aussi observées dès 200 °C. La faible résistance des fibres végétales à toute élévation de température limite leur usage comme renfort de composites thermoplastiques à des matrices à faible température de fusion (< 200 °C) comme le (HDPE), le (PP) et le (PE).

Une étude réalisée sur la décomposition thermique des CBP à base de PP et de fibres de bois par thermogravimétrie montre que le PP est plus stable thermiquement que les fibres de bois [114,115]. D'autre part, les petites fibres semblent diminuer légèrement la stabilité thermique par rapport aux autres fibres plus grandes et la dégradation de la fibre peut accélérer la décomposition du polypropylène [107].

I.3.10. Fabrication des composites bois polymères (CBP)

Les composites biosourcés sont mis en œuvre par les techniques habituellement utilisées pour la mise en forme des résines vierges [90]. Ces techniques, réalisées manuellement ou mécaniquement, consistent à disposer les fibres et la matrice dans un moule et solidifier ensuite la matrice. Il est important de préciser que les caractéristiques des fibres cellulosiques imposent que la température du moulage ne dépasse pas 180°C voire 200°C. La réussite de l'opération nécessite de garantir la forme de la pièce, de limiter le retrait et d'éviter les défauts en surface et en volume notamment les aspérités et les vides respectivement. De plus, le dosage des composants de base doit être optimal pour répondre aux propriétés mécaniques recherchées. Les informations bibliographiques relatives aux procédés de fabrication des CBP notamment les techniques plasturgistes et industrielles ainsi leurs classifications sont données en annexes 1 et 2.

Conclusion

Dans ce chapitre bibliographique, nous avons décrit la répartition et la superficie de la forêt du pin maritime dans le monde et au Maroc afin d'avoir une idée sur ces réserves pour des éventuelles valorisations. Par la suite nous avons présenté une description de l'anatomie ainsi quelques propriétés physiques et mécaniques et vibratoires du bois de pin maritime afin de mieux comprendre la variation des différentes grandeurs.

Au niveau de la deuxième partie nous avons présenté les différents types de polymères synthétiques, leurs caractéristiques mécaniques, thermiques et physiques. Au niveau des composites bois-polymère nous avons donné une description de leurs compositions et leurs architectures, les additifs utilisés au niveau de la fabrication, par la suite nous avons donné leurs classifications selon les normes en vigueur, ainsi qu'une description de leurs procédés de fabrication.

CHAPITRE II

Pin maritime

Méthodologie d'échantillonnage et de Caractérisations physique et mécanique

Composites Bois-Polymères

Méthode d'élaboration et de caractérisations texturale, physique, et mécanique

Introduction

Ce chapitre regroupe tous les moyens mis en œuvre dans le choix et la caractérisation des matières premières examinées dans ce travail. Sont ainsi exposés, en premier lieu, les critères de choix des arbres échantillons, la méthode de leur abattage, de leur sciage, de la confection des éprouvettes et des planches, les techniques de mesures des contraintes de croissances des arbres sur pied et de leur séchage ainsi que les équipements expérimentaux d'estimation de leurs propriétés physiques et mécaniques en respectant les normes en vigueur. Ensuite, sont présentés les polymères entrant dans la composition des Composites Bois-Polymères notés CBP, leur formulation, le procédé choisi pour leur élaboration, la confection des éprouvettes et les équipements expérimentaux ayant servi à leurs caractérisations physiques, mécaniques. Enfin, sont décrits les équipements ayant servi aux analyses spectrales, microscopiques et texturales des échantillons de bois, des polymères et des CBP.

II.1. Pin maritime

II.1.1. Origine et choix des arbres échantillons

L'essence de bois choisi dans ce travail est le pin maritime (*Pinus pinaster*) issu de plantations reboisées de la région de Mechra el Ketan à Maâmoura Occidental (figure 11).

Les arbres échantillons, au nombre de quatre, sont des arbres dominants, âgés de 20 ans, appartenant à un peuplement homogène et possédant un diamètre compris entre 20 et 35 cm, une hauteur de 1,30 m du sol (figure 11 et 12). Les arbres sélectionnés sont non fourchus, à cimes bien équilibrées, dépourvus de défauts notamment les attaques des parasites, des champignons et de la pourriture, les creux, ... et portant le minimum de branches pour diminuer le nombre des nœuds.

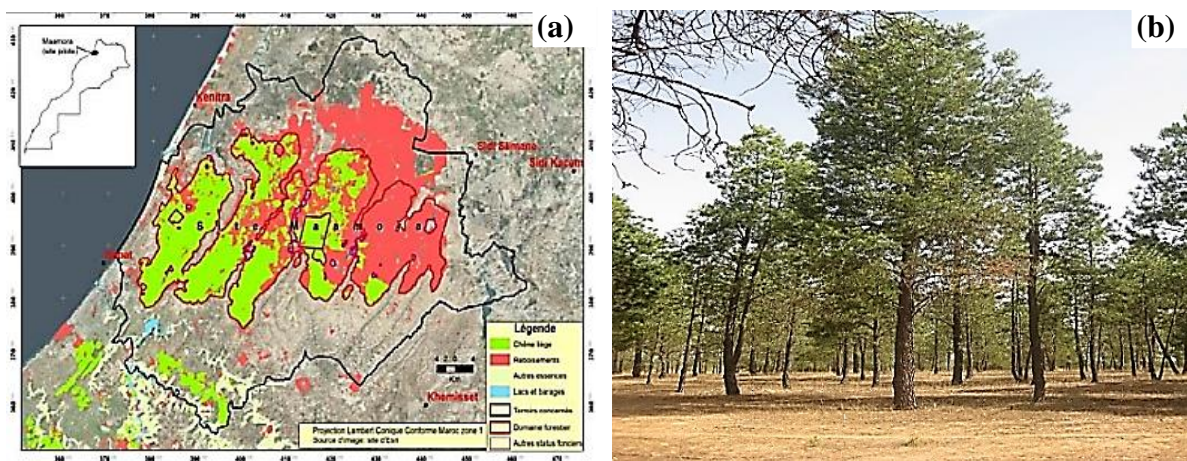


Fig.11. (a) Reboisement du pin maritime dans la forêt de Maâmora (zone en rouge) ; (b) Echantillon de l'arbre du pin maritime.

II.1.2. Dendrométrie des arbres échantillons

Pour mesurer les caractéristiques dendrométriques suivant la répartition des quatre arbres échantillons (figure 12 a), nous avons procédé à la numérotation des quatre arbres (figure 12 b) et à la mesure des circonférences avant et après écorçage (figure 12 c). La localisation des quatre positions relatives aux orientations : Nord, Est, Sud et Ouest à la périphérie de chaque arbre est faite pour la mesure de l'humidité sur pied par un capteur d'humidité type Brennenstuhl (figure 12 d).

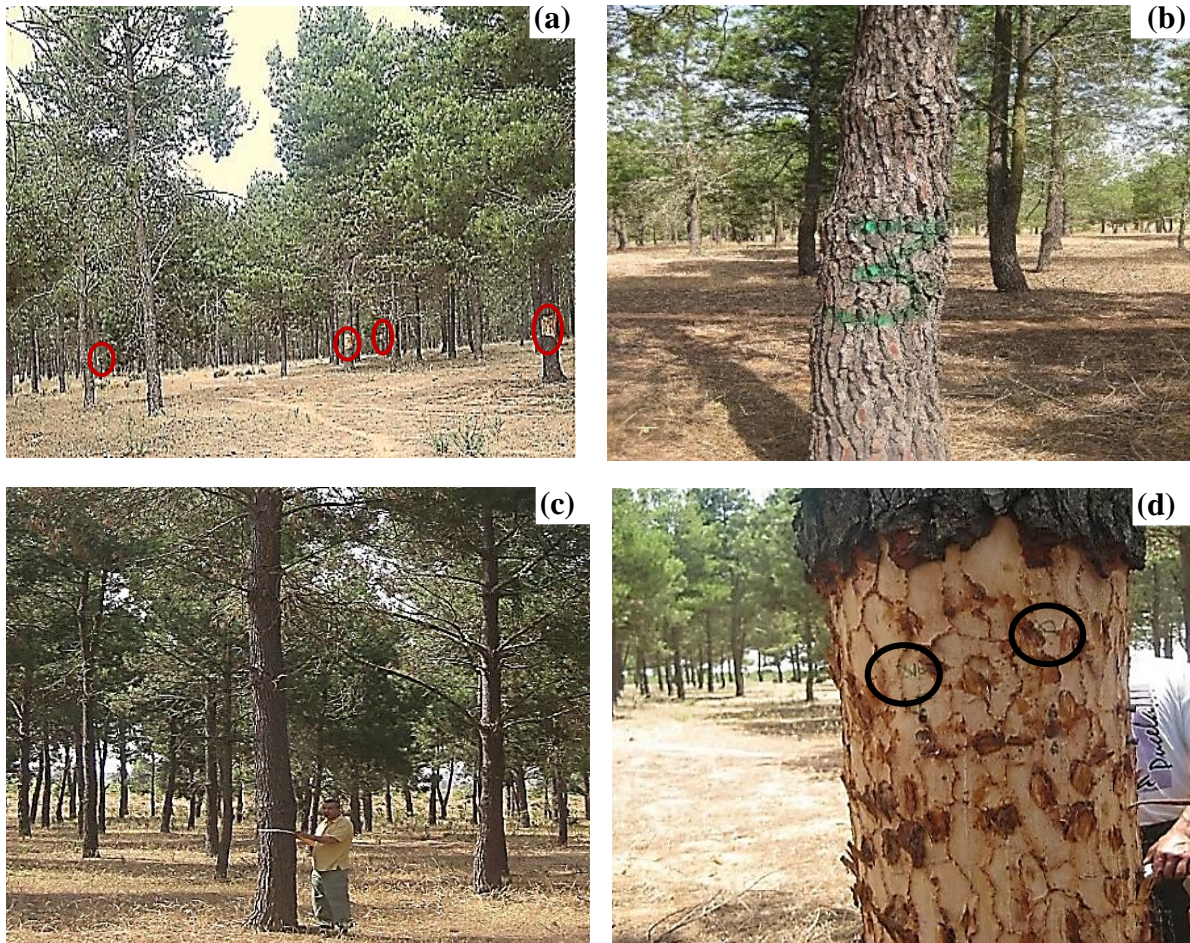


Fig.12. (a) Répartition des 4 arbres échantillons ; (b) Arbres échantillons numérotés avant écorçage ; (c) Mesure de la circonférence du tronc ; (d) Ecorçage de l'échantillon d'arbre de pin maritime et localisation des huit positions pour mesures des ICC.

II.1.3. Mesure des indicateurs de contraintes de croissance

Les indicateurs des contraintes de croissance ou « growth stress indicator » en anglais, respectivement notés ICC et GSI, sont estimés sur pieds généralement par la méthode du trou unique [116]. Le principe de cette dernière consiste à mesurer le déplacement instantané engendré par le relâchement des contraintes de croissance. Ce déplacement serait proportionnel à la déformation longitudinale causée par la maturation des cellules fraîchement produites dans le bois. La méthode du trou unique est en fait une méthode indirecte de mesure des ICC. Elle permet, comme il est déjà précisé, d'évaluer ces derniers après relaxation des contraintes de croissance bloquées dans le bois. Par ailleurs, la relaxation des contraintes étant provoquée sur la partie extérieure du tronc, les ICC relevés sont relatifs aux contraintes de croissances périphériques.

Pour mettre en pratique cette méthode, nous avons procédé comme proposé dans la littérature [117]. Ainsi, l'arbre sur pied est écorcé jusqu'au cambium à l'emplacement des mesures en l'occurrence à 1,30 m du sol (figure 12 d). A l'aide d'un gabarit, deux pointes alignées dans le sens longitudinal à 45 mm l'une de l'autre ont été plantées à 10 mm de profondeur (figure 13 a). Cette opération est répétée tous les 45° sur la circonférence ce qui donne huit positions de mesure des ICC sur chaque arbre. Un bâti, placé sur les deux pointes, est muni d'un comparateur, type Mitutoyo, permettant une précision du micron sur les mesures de déplacement (figure 13 b).

Le bâti est plaqué contre l'arbre avec deux élastiques sur une surface plane. Le palpeur du comparateur appuie sur l'une des deux pointes tandis que le châssis repose sur l'autre pointe. Le comparateur est mis à zéro et le trou de 20 mm de diamètre et de 10mm de profondeur est percé à égale distance des deux pointes. Il s'ensuit un déplacement de ces dernières, représentant ICC, mesuré en mm. Le déplacement du comparateur est négatif pour un bois de compression et positif pour un bois de tension. L'arrêt du perçage du trou prend fin une fois la valeur indiquée par le comparateur est stable (figure 13 c et d). Cette opération est encore répétée sur les 7 autres points de mesure. Au total, huit mesures sont effectuées sur huit positions relatives aux points cardinaux orientations : nord, nord-est, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest et nord-ouest afin d'obtenir un champ de distribution des contraintes de croissance exploitable sur toute la périphérie du tronc. La valeur directement lue sur le comparateur correspond à la variation de distance entre les pointes D_d . L'expression qui relie cette dernière à la déformation de maturation dans le sens longitudinal a_L est la suivante :

$$a_L = K * D_d \quad (5)$$

Avec :

a_L : Déformation de maturation (en micro déformations).

K : Constante en micro déformation/microns.

D_d : Variation de distance entre les pointes (en microns).



Pointes de référence.



Bâti composé d'un châssis muni d'un comparateur.



Perçage du trou de diamètre de 20 mm.



Fig.13. Mesure des indicateurs de contraintes de croissance.

II.1.4. Techniques d'abattage, d'ébranchage et de tronçonnage des arbres

L'abattage d'un arbre peut causer de graves ennuis s'il ne respecte pas un protocole éprouvé dans le domaine de la foresterie. C'est ce que nous détaillons dans les paragraphes ci-après.

- *Entaille de direction d'abattage*

Avant d'abattre l'arbre, nous avons déterminé, tout d'abord, la direction de la chute. Cette dernière dépend de la direction du vent, de la forme, de la position de l'arbre et du site. Une fois la direction de la chute déterminée, nous avons supprimé les

contreforts à la base du tronc. Cela permet un meilleur contrôle de la direction de la chute, et bien sûr nous avons aménagé une zone de repli sécuritaire.

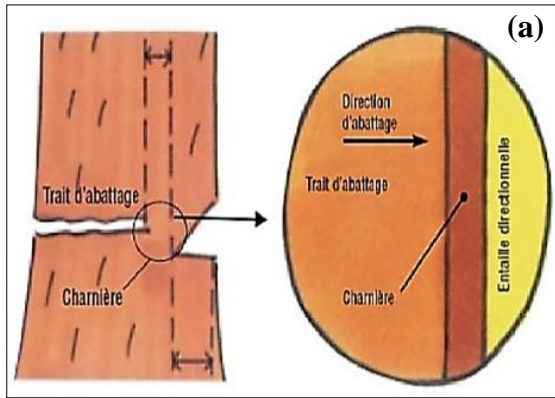
L'entaille comporte deux traits de scie distincts : Le trait supérieur d'attaque de l'arbre à 45° ne doit pas dépasser le quart du diamètre de l'arbre. Le trait inférieur est horizontal, plancher de l'entaille, doit venir rejoindre le trait supérieur. Le trait de scie horizontal doit se situer à environ 3 cm au-dessus du plancher de l'entaille (figure 14 a). Le bûcheron exécute la coupe d'abattage du côté opposé à l'entaille précédemment effectuée, en conservant une zone de rupture (figure 14 b).

- *Ebranchage et tronçonnage*

Avant de commencer l'ébranchage, la position du tronc est marquée pour apprécier les efforts subis (porte-à-faux, repos sur des grosses branches...).

L'ébranchage démarre du pied vers la cime en commençant par les grosses branches. Le tronc est tourné, autant de fois que nécessaire, d'un quart de tour pour couper les branches restantes (figure 14 c). Le tronc est ensuite tronçonné, autrement dit scier transversalement sous forme de billons de longueur 2,20 m (figure 14 d et e). Un numéro est attribué à chaque bille à partir du pied auquel est associé un autre numéro relatif à l'arbre d'appartenance. Les directions nord et sud sont marquées sur chaque bille (figure 14 f).

Une rondelle d'épaisseur 2,5 cm est prélevée de chaque bille du côté gros bout, mise immédiatement dans un sac plastique hermétique pour éviter l'échange avec le milieu extérieur et pour que la rondelle conserve son état 'natif' jusqu'au laboratoire (figure 14 g et h).



(a) Entaille directionnelle comportant une ouverture de 45°



(b) Abatage de l'arbre du pin maritime.



(c) Ébranchage du tronc



(d) Tronçonnage du tronc



(e) Billons découpés



(f) Billon numéroté



(g et h) Découpe des rondelles d'arbre abattu.

Fig.14. Techniques d'abatage, d'Ébranchage et de tronçonnage des arbres.

II.1.5. Sciage des grumes et son rendement

Il existe différents modes de sciage, le plus adapté, dans notre cas, est celui en mode plot suivant la direction perpendiculaire à la plus forte valeur d'ICC puisque que le rayon des grumes des arbres échantillons est faible. C'est pourquoi, le sciage a été réalisé par une scie a grume de type GUILLIET au Centre de Recherche Forestier de Rabat (CRF) de Rabat (figure 15). Le sciage est réalisé en plusieurs parties et le rendement secondaire du sciage est déterminé à partir des mesures effectuées sur le billon et de l'expression (6) ci-après :

- L'épaisseur du Gros bout, au Milieu et au Fin bout.
- La largeur du Gros bout, au Milieu et au Fin bout sur les deux faces : la face ouverte et la contre face.
- La longueur des plots.
- Les circonférences et les longueurs des billons.

$$R_s = \left(\frac{\sum_i v_{pi}}{v_{Billon}} \right) * 100 \quad (6)$$

Avec :

V_{pi} : Volume des planches juste après sciage ou délignage.

V_{Billon} : Volume de la grume.



Fig.15. Scies à grume.

II.1.6. Confection des éprouvettes et des planches

Plusieurs mesures vont être effectuées sur le bois du pin maritime. Ces mesures nécessitent des pièces dont les dimensions sont imposées par les normes relatives à chaque type d'essai. Les pièces sont de deux sortes : des éprouvettes et des planches. Les unes comme les autres sont découpées à partir de zones bien précises du bois.

Ainsi, les éprouvettes destinés aux mesures de l'humidité, de l'infra-densité et des différents retraits du bois sont découpées à partir d'une rondelle de 2,5 cm (figure 16). Ces éprouvettes sont découpées plus précisément du plateau diamétral Nord Sud traversant l'axe médian et passant par la moelle (figure 17). Les planches débitées des billons sont soumises aux séchages naturels et artificiels. Après leur séchage, les planches séchées artificiellement sont les seules à être débitées en éprouvettes affectées aux mesures des caractéristiques physiques et mécaniques du bois. Un schéma simplifié de confection des éprouvettes et des planches est donné sur la figure 17 avec les dimensions des pièces et leur dénomination associée aux types d'essais auxquels elles sont prévues. De plus, la norme française NF B 51 008 a été prise en considération dans la confection des éprouvettes. Ces dernières doivent être prélevées de telle manière que les cernes d'accroissement soient parallèles à la direction tangentielle du bois, le sens longitudinal colinéaire à l'axe longitudinal OX des éprouvettes et le sens tangentiel fait un angle de 45° avec l'axe OY.

Le nombre d'éprouvettes confectionnées est de 30 éprouvettes par arbre, soit 120 pour les quatre arbres. Le nombre de planches est de 05 par billon, soit 100 planches pour les quatre arbres.

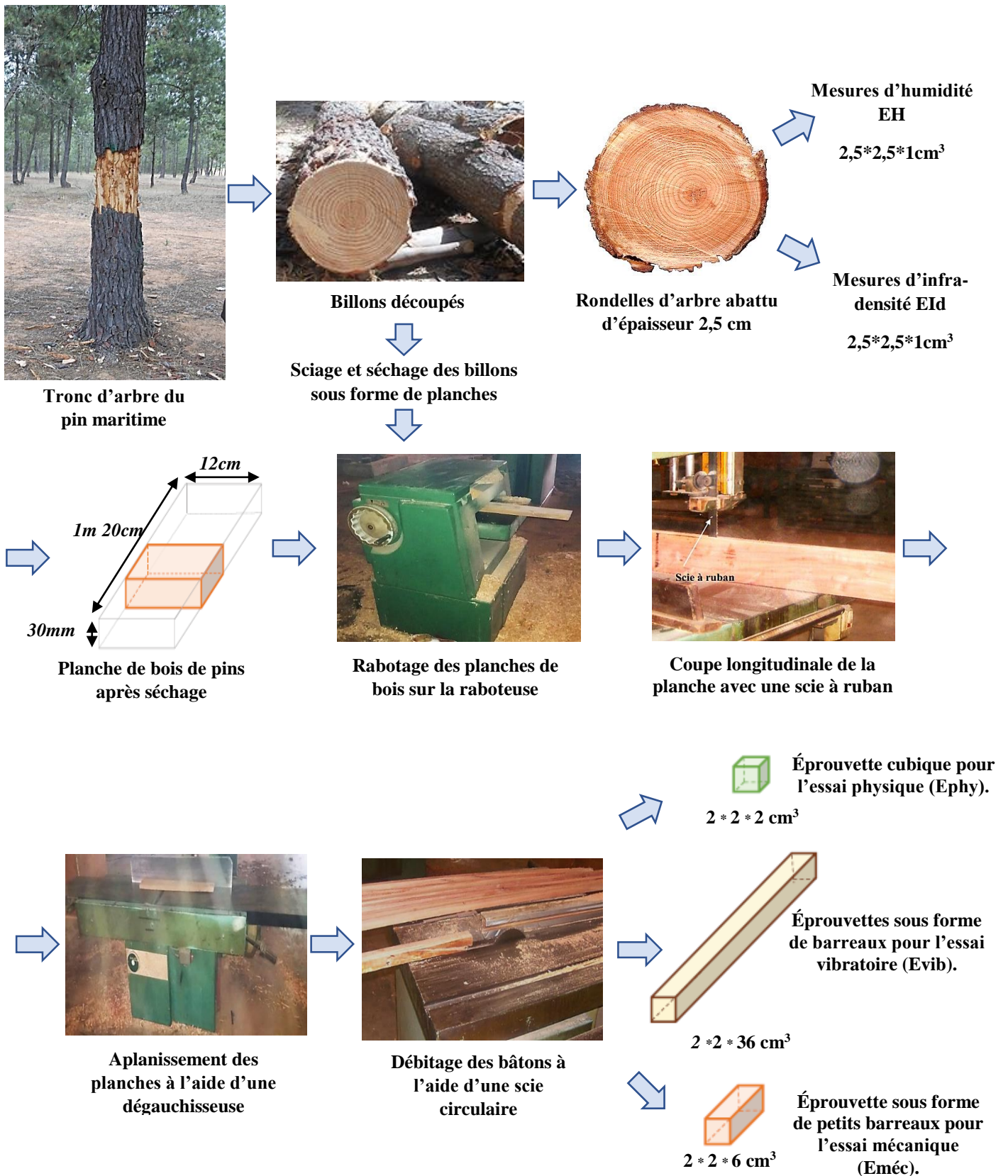


Fig.16. Différentes étapes de confection des éprouvettes.



Fig.17. Étapes de prélèvement des éprouvettes EH et EID pour les mesures respectives des profils d'humidité, d'infra-densité et des différents retraits.

II.1.7. Séchages naturel et artificiel des planches

Les séchages naturels et artificiels du bois ont été effectués au CRF de Rabat. Nous précisons les échantillons utilisés et les conditions des deux séchages précités.

II.1.7.1. Séchage naturel

Le séchage est effectué sur les planches dont la forme et la disposition son illustrées sur la figure 18. Les planches ont des longueurs comprises entre 1,00 et 1,20 m, des largeurs variantes entre 10 et 30 cm et d'épaisseurs égales à 30 mm. Le séchage naturel est fait sous abri, à l'air libre sur 32 planches.

Les planches de bois sont disposées en piles bien ventilées, avec platelage entre chaque rangée de planches et à une hauteur suffisante du sol (figure 18). Le suivi de l'humidité a été réalisé par pesée périodique durant quatre mois environ, du mois de Mars au mois de Juin 2015. L'humidité initiale moyenne des échantillons est de 54 % environ.

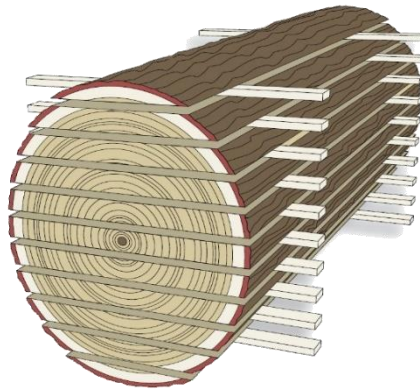


Fig.18. Disposition des planches au cours du séchage naturel sous abri.

II.1.7.2. Séchage artificiel

Le séchage artificiel est réalisé sur des planches de longueur 1m 20, de largeur 12 cm, et d'épaisseur 30 mm (figure 19), utilisées pour le séchage artificiel. Les planches ont été séchées dans un séchoir semi-industriel "Cathild" (figure 19) permettant de visualiser et de contrôler en temps réel l'humidité, la température, la vitesse de ventilation et l'humidité d'équilibre. Ces dernières ont été fixées à une humidité relative de 11 % et à une température de 30 °C. Le séchoir est au départ rempli par les planches empilées sous forme de rangées horizontales et séparées par des baguettes de 2*2 cm², soit six baguettes par rangée. Le choix des conditions de séchage tient compte des propriétés physiques et mécaniques du bois de pin maritime, à savoir : le retrait, la densité, la dureté et l'état d'humidité initial [118].

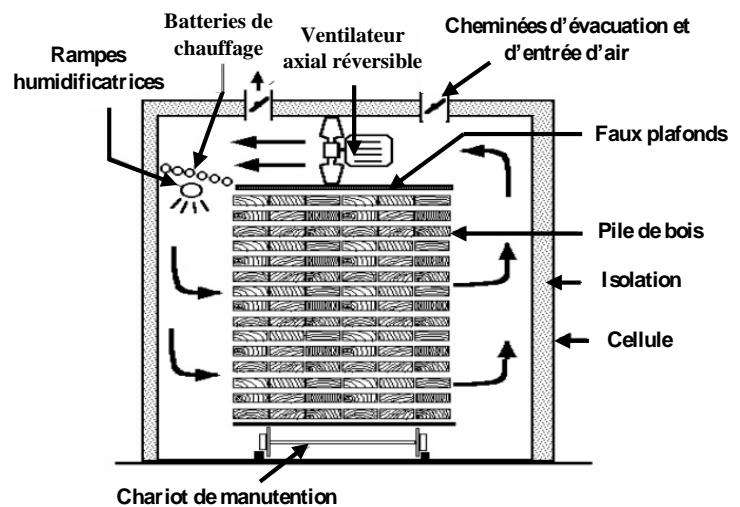


Fig.19. Schéma du Séchoir Cathild.

II.1.8. Mesures de la teneur en humidité, de l'infra-densité et des variations dimensionnelles

La teneur en humidité, l'infra-densité et les variations dimensionnelles ont été mesurées sur des éprouvettes EH, EId et Ephy (figure 16) respectivement.

Ces mesures respectent la norme marocaine 'NM 6-601-B-009'. Les mesures de la teneur en humidité, de l'infra-densité et des variations dimensionnelles sont faites en discontinu. Autrement dit, les pesées et les mesures des dimensions des éprouvettes sont réalisées avant et après leur séjour dans une étuve ventilée à 103 ± 2 °C pendant 48 heures. Les pesées sont prises sur une balance électronique 'SARTORIUS' au centième de gramme près (figure 20). Les dimensions des éprouvettes sont ensuite relevées par un comparateur MITUTOYO (figure 20).

- *Teneur en humidité*

Le taux d'humidité du bois est estimé, toujours selon la norme marocaine précitée, par l'expression suivante :

$$H\% = \frac{M_H - M_0}{M_0} * 100 \quad (7)$$

Avec :

M_H et M_0 : Masses de l'éprouvette EH aux états H et anhydre.

- *Infra-densité*

A partir des pesées et des mesures des dimensions des éprouvettes EId avant et après séchage, la densité et l'infra-densité sont calculées pour un taux d'humidité donné H% comme suit :

$$D_H = \frac{M_H}{V_H} \quad (8)$$

M_H et V_H : Respectivement masse et volume de l'éprouvette à l'humidité H %.

$$D_b = \frac{M_0}{V_s} \quad (9)$$

M_0 et V_s : Respectivement masse de l'éprouvette à l'état anhydre et son volume à l'état saturé.

- **Variations dimensionnelles**

A partir des dimensions des éprouvettes relevées avant et après passage à l'étuve des éprouvettes Ephy, les retraits linéaires Radial R_R , Tangentiel R_T , Longitudinal R_L et volumiques R_V sont calculés par les expressions suivantes :

$$R_R = \frac{L_{RS} - L_{R0}}{L_{RS}} * 100 \quad R_T = \frac{L_{TS} - L_{T0}}{L_{TS}} * 100 \quad R_L = \frac{L_{LS} - L_{L0}}{L_{LS}} * 100 \quad R_V = \frac{V_S - V_0}{V_S} * 100$$

(10) (11) (12) (13)

Avec :

V_S, L_{RS}, L_{TS} et L_{LS} : volumes et dimensions de l'échantillon à l'état saturé et V_0, L_{R0}, L_{T0} et L_{L0} : volumes et dimensions de l'échantillon à l'état anhydre.



Fig.20. Balance électronique type SARTORIUS ; Comparateur électronique type MITUTOYO.

II.1.9. Point de saturation des fibres

Les mesures du point de saturation des fibres ont été effectuées sur des éprouvettes EH de dimension de $2*2*2 \text{ cm}^3$. Le point de saturation des fibres noté PSF, est exprimé par l'expression suivante :

$$PSf = \frac{V_S - V_0}{V_H - V_0} * H\% \tag{14}$$

Avec :

V_s : Volume de l'éprouvette à l'état saturé obtenu après immersion.

V_0 : Volume de l'éprouvette à l'état anhydre et V_h : Volume de l'éprouvette à l'état humide.

II.1.10. Essai de compression axiale

La compression axiale du bois a été réalisée au Centre de recherche forestier (CRF) de Rabat, sur les éprouvettes dénommées Eméc de $2*2*6 \text{ cm}^3$ (figure 16) ayant un taux d'humidité moyen de 11 %. L'essai consiste à solliciter les éprouvettes par compression suivant le sens parallèle au fil du bois pour mesurer la charge maximale de rupture (figure 21) [119]. Cet essai est effectué sur une machine Testwel d'une capacité de 12 tonnes. Elle se compose de 3 blocs (figure 22) :

Le premier bloc contient le groupe hydraulique qui fournit la pression, les manettes de commande rapide et lente, les contre poids qui permet de régler l'échelle des essais, le cadran de lecture et un dispositif d'enregistrement.

Le deuxième bloc contient les colonnes d'appui, des coulisseaux pour la précision des mouvements, une règle graduée pour la mesure des déplacements et deux plateaux qui permettent de réaliser les essais. L'un de ces plateaux est fixe, l'autre est mobile à l'aide d'un vérin hydraulique.

Le troisième bloc contient une centrale d'acquisition de type ALMEMO 2290-8 V5 servant à mesurer à l'aide des capteurs liés à la machine, la force exercée par seconde et le déplacement correspondant. L'enregistrement est transféré directement via le port parallèle dans une mémoire utilisateur du PC qui enregistre et gère les données à l'aide du logiciel AMR-Control.

L'essai de compression dure de 1,5 à 2 min. La contrainte de rupture en compression σ_a de chaque éprouvette à l'humidité H % est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_a = \frac{R_h}{t * r} \quad (15)$$

Avec :

R_h la charge maximale de rupture à l'humidité H %, t et r les dimensions de la section transversale de l'éprouvette à l'humidité H %.



Fig.21. Epreuves Eméc soumises à la compression axiale.

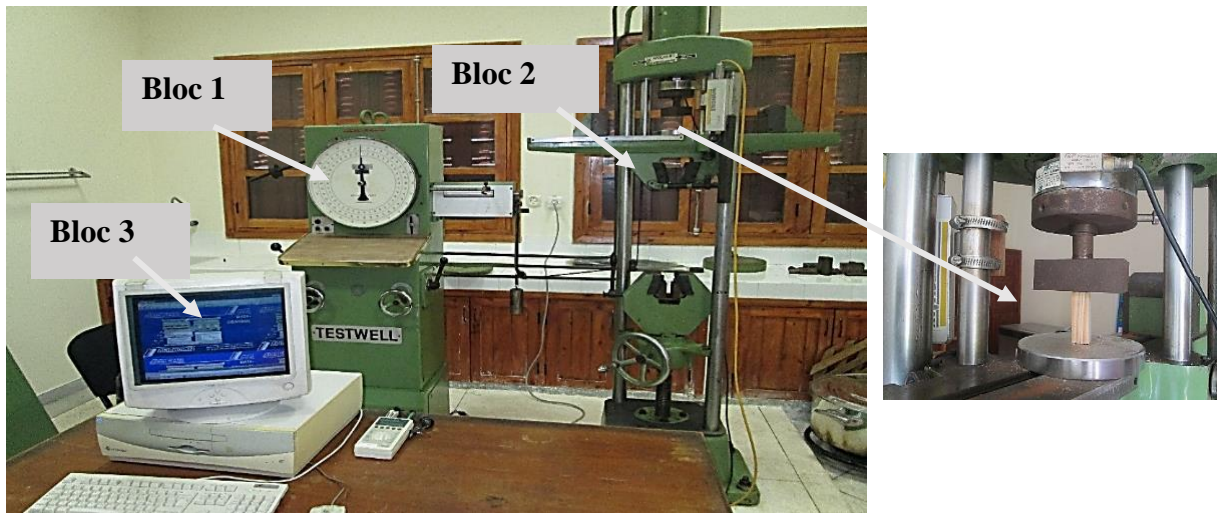


Fig.22. Presse TestWel pour essais de compression.

II.1.11. Essais de dureté

La dureté du bois a été mesurée au Centre de recherche forestier (CRF) de Rabat, sur des éprouvettes dénommées Eméc de $2*2*6 \text{ cm}^3$ ayant une humidité de 11 %. Cette caractéristique est mesurée par le procédé Monnin qui obéit à la norme Française standard NF B 51-013 [120]. La figure 23 illustre le procédé de dureté Monnin. Pendant cet essai, une force de 196 daN est exercée progressivement grâce à un cylindre de diamètre 30 mm à une vitesse de 0,5 mm/min. La largeur "a" de l'empreinte permet d'atteindre le chiffre de dureté Monnin N en utilisant l'expression suivante :

$$N = \frac{1}{15 - 0,5(900 - a^2)^{1/2}} \quad (16)$$

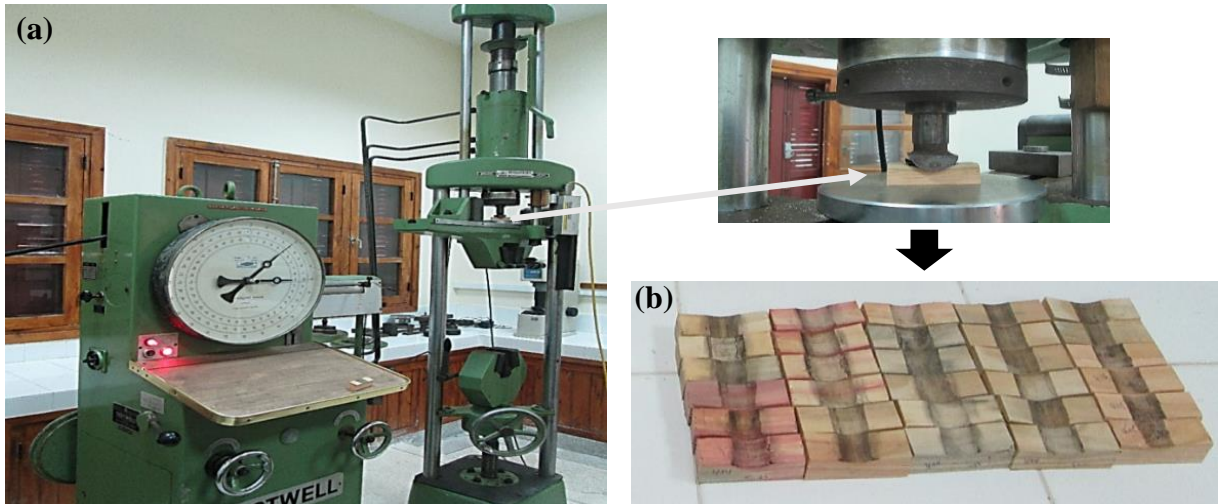


Fig.23. (a) Presse TestWel pour essai de dureté sur le bois ; (b) Conséquence de l'essai de dureté sur les échantillons du bois.

II.1.12. Essais BING

La méthode vibratoire BING permet de déterminer les propriétés mécaniques d'une pièce de bois à partir de son comportement vibratoire. Cette méthode, développée par le CIRAD-Forêt, est largement utilisée dans la caractérisation non invasive du bois. Ainsi, la mesure des modules d'élasticité et de cisaillement dynamiques est réalisée par cette méthode au CRFR, sur des éprouvettes Evib de $2*2*36 \text{ cm}^3$ (figure 16).

➤ *Déroulement du test*

- L'éprouvette de $20*20*360 \text{ mm}^3$ est pesée et la moyenne de la hauteur et de la largeur sur trois positions équidistantes sont mesurées.
- L'éprouvette est mise en place sur les deux élastiques en respectant l'orientation choisie de la sollicitation ainsi que la symétrie des appuis. Le microphone est ensuite placé à l'une des extrémités de l'éprouvette (figure 24).
- Une percussion est donnée sur l'extrémité libre de l'éprouvette en veillant à ce que les vibrations soient les plus libres possibles et dans le plan vertical de sollicitation.
- On vérifie à l'écran la qualité du spectre et des pics de fréquences obtenus. Ces derniers doivent être suffisamment nets et distincts.

- Deux pics au moins sont sélectionnés pour la mesure en leur affectant un numéro d'ordre croissant avec le niveau de fréquence.

- La mesure est réitérée plusieurs fois jusqu'à obtention d'un signal semblable à celui illustré sur la figure 25.



Fig.24. Illustration de l'essai vibratoire Bing.

➤ *Acquisition et traitement du signal acoustique*

Le micro-ordinateur gère la totalité du paramétrage du boîtier d'acquisition ''voies d'acquisition, amplificateurs des signaux, filtre anti-repliement, temps d'acquisition et nombre d'échantillons recueillis'' et du traitement de l'information recueillie à la suite de la percussion appliquée (figure 25). Ainsi :

L'*onde sonore* émise par l'extrémité de la poutre, est transformée en signal électrique par un microphone. Celui-ci est amplifié, filtré puis échantillonné par l'intermédiaire du boîtier d'acquisition. Puis, après conversion du signal analogique en information numérique, l'enregistrement est transféré directement via le port parallèle dans une mémoire utilisateur du PC.

La *composition spectrale* de l'enregistrement est obtenue par transformée de Fourier rapide. La largeur spectrale dépend des paramètres d'acquisition fixés (nombre de points et durée d'acquisition). Un zoom sur le spectre est possible.

La *poutre* est supposée obéir au modèle de Timoshenko ou de Bernoulli [119]. A partir des fréquences propres sélectionnées, le module d'élasticité dynamique E et le module de cisaillement G dans le plan du mouvement, sont calculés par le logiciel.

Afin de faciliter l'identification des fréquences propres, le logiciel intègre un calcul théorique basé sur les relations qui existent entre les modules d'élasticité et la masse volumique à une humidité donnée. Les mesures ainsi données par le logiciel sont traitées par Excel. Parmi les intrants du logiciel, le taux d'humidité du bois est nécessaire au moment de l'essai.

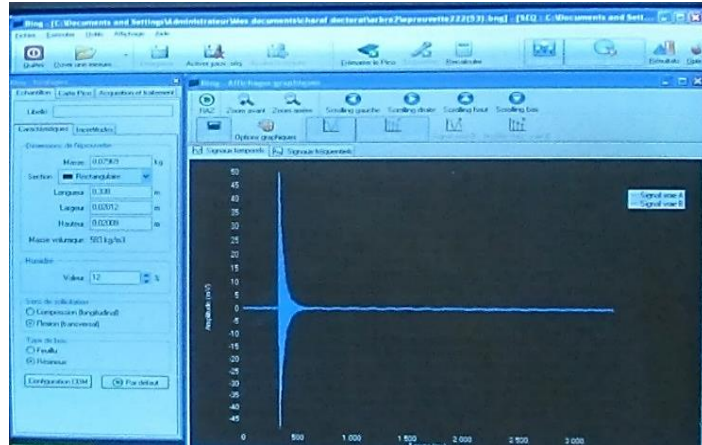


Fig.25. Signal temporel enregistré suite à une percussion.

II.2. Polymères synthétiques

Les polymères utilisés dans la confection des CBP sont le polyéthylène haute densité et le polypropylène respectivement notés PEHD et PP dans leur états brut et recyclé (figure 26).

Les polymères bruts PEHD et PP sont achetés respectivement de la société Saoudienne 'AYTB Company Ltd' et de la société Portugaise 'PREVINIL'. Le tableau 6 regroupe les caractéristiques des deux polymères vierges fournis par les deux sociétés précitées.

Les PEHD et PPr recyclés (figure 26), ils ont été récupérés à partir des déchets (pots de yaourt, bouteilles et flacons de détergents...) et des conduites d'eau potable respectivement. Les polymères recyclés ont été soigneusement lavés à l'eau distillée et séchés à 65 °C pendant 12 heures pour éliminer toute l'humidité pendant le lavage.

Tableau.6 Propriétés physiques et mécaniques des différents plastiques utilisés.

Propriétés	PEHDv	PEHDr	PPv	PPr
Masse volumique (kg/m ³)	942	-	903	-
Température de fusion (°C)	138	-	165	-

v : vierge ; r : recyclé



Fig.26. Polymères vierges et recyclés.

II.3. Composites Bois-Polymère

II.3.1. Matières premières

Les Composites Bois-Polymère (CBP) sont élaborés à partir de la sciure de pin maritime combinée soit au DEHD soit au PP avec ou sans ajout de carbonate de calcium CaCO₃. Le PEHD et le PP sont mélangés à la sciure de bois dans leur état soit brut soit recyclé. Le bois en copeaux provient de la scierie du CRF de Rabat (figure 27).

Les copeaux sont séchés à 103 °C pendant 24 heures jusqu'à une humidité d'environ de 2 à 3 %, puis broyés à l'aide d'un broyeur 'Retsch' adapté au bois, la granulométrie retenue est de l'ordre de 0,5 mm. Les polymères ont été broyés à l'aide du broyeur 'Fritsch standard funnel 15.430.000' et la granulométrie retenue est également de 0,5 mm.

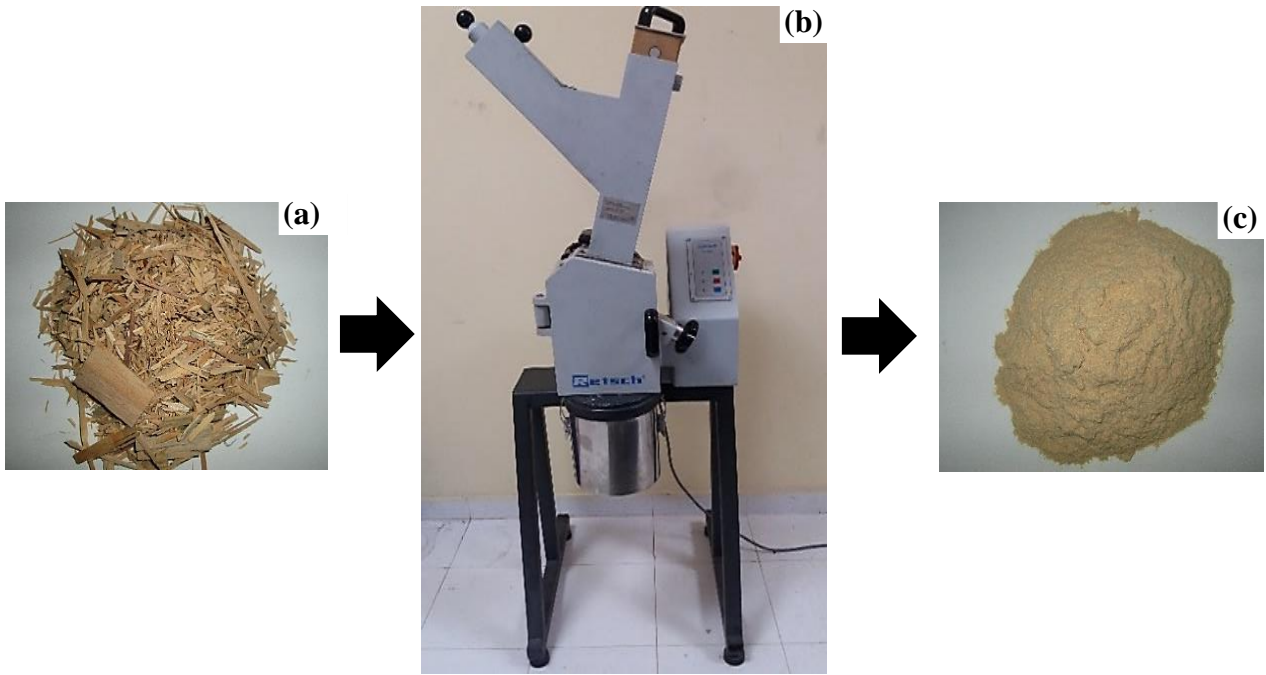


Fig.27. (a) Matière première du bois de pin maritime ; (b) Broyeur à couteaux haute performance sm2000 retsch ; (c) Farine de bois du pin maritime.

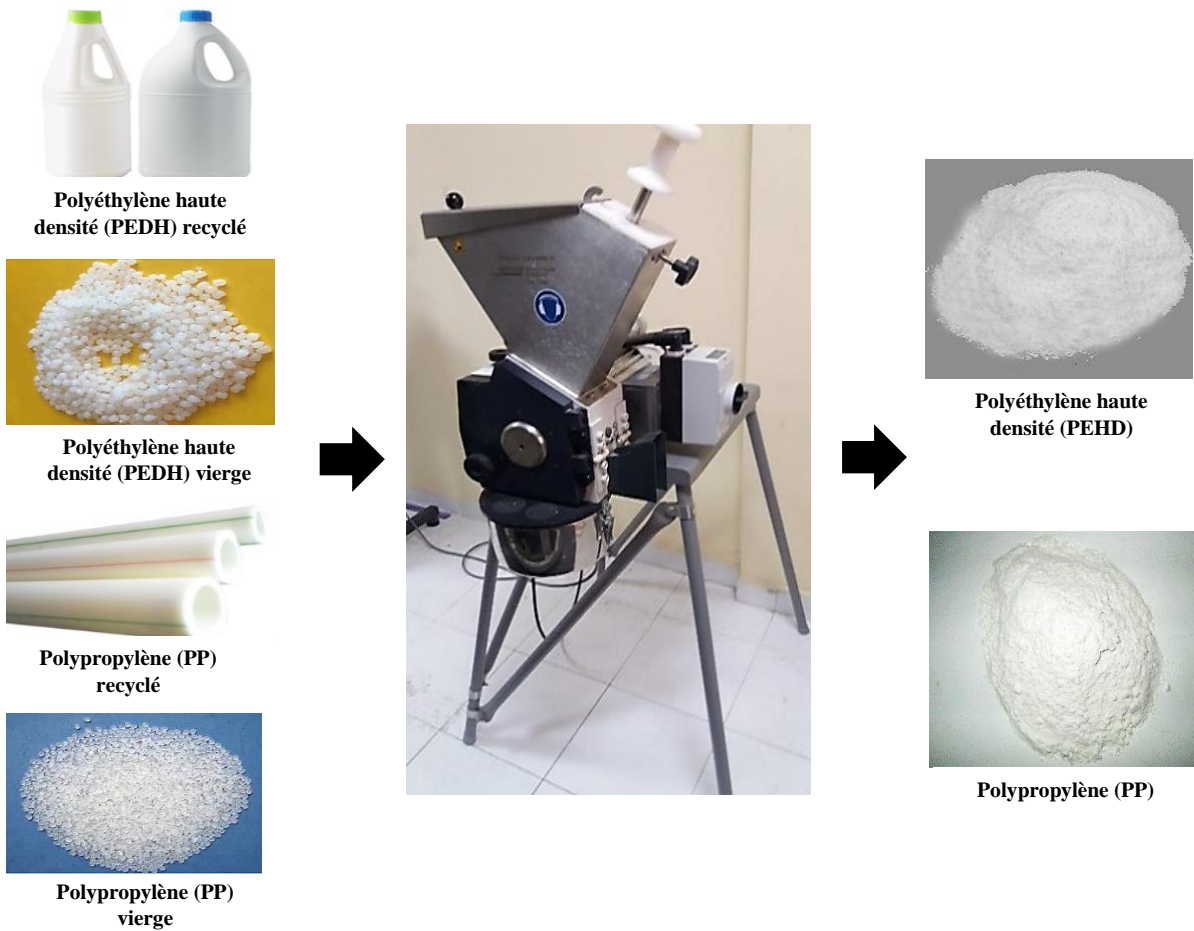


Fig.28. Polymères synthétiques brut et recyclé broyés.

II.3.2. Formulation des CBP

La poudre de bois est additionnée au polymère, l'agent de couplage n'est pas systématiquement présent. Pour homogénéiser la mixture, les substances précitées sont placées dans un mélangeur où la vitesse et la durée du mélange sont respectivement de 55 tr/min et 5 min. Les différentes formulations examinées dans ce travail sont indiquées dans le schéma de la figure 29.

Pour chaque formulation, cinq échantillons CBP ont été préparés, soit 90 échantillons au total.

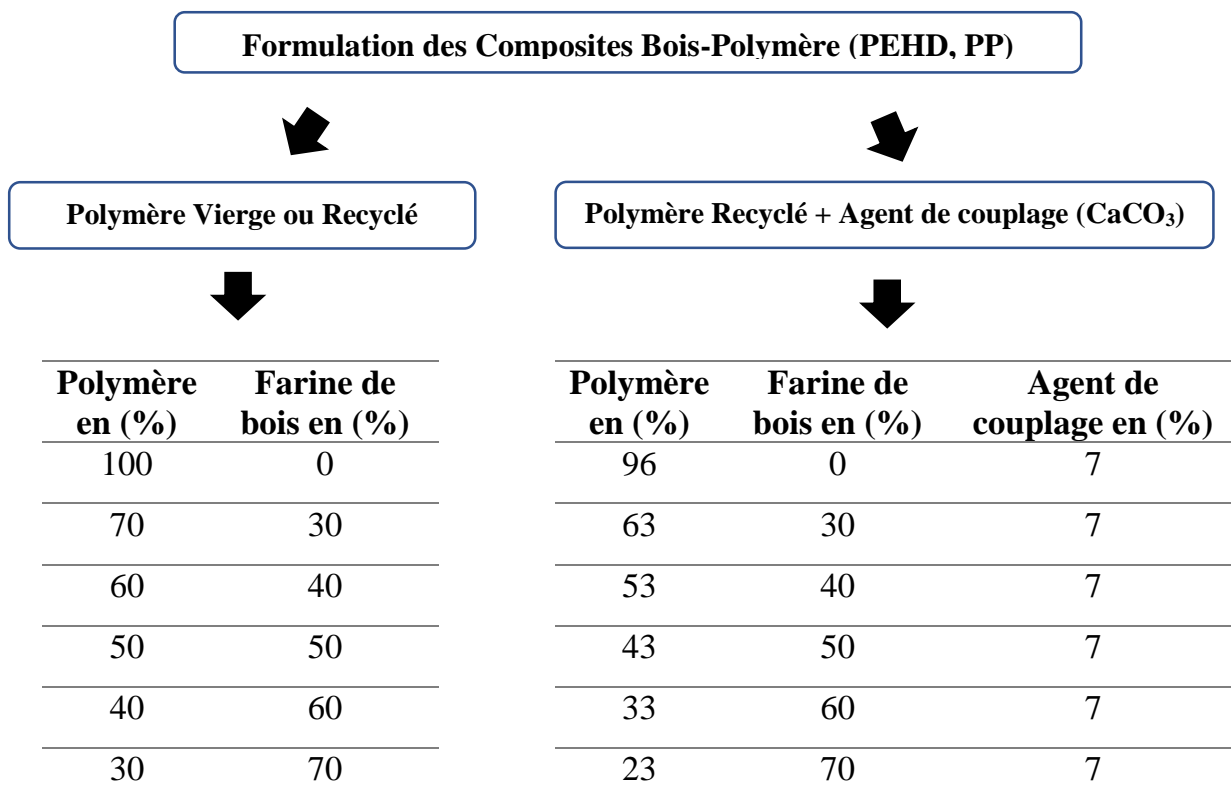


Fig.29. Formulation des composites bois-polymère.

II.3.3. Procédé de fabrication des CBP

Le procédé de fabrication des CBP choisi est le moulage par compression réalisé au sein du CRFR. Les étapes de fabrication des panneaux CBP sont indiquées sur la figure 30.

Le mat obtenu avec les différentes formulations de CBP a été coulé dans un moule métallique de dimension 20*20 cm² (figure 30). Les échantillons ont été soumis au protocole ci-après :

- application de 2 ou 3 cycles de pressage - dépressage à P = 2 MPa et T= 180 °C ;
- application d'un pressage de P = 5 MPa pendant 6 min à 180°C [121] ;
- application d'un pressage à froid de P= 5 MPa pendant 5min [122].

Après le moulage par compression, les bordures des panneaux sont ajustées par une scie circulaire et l'épaisseur obtenue à la fin de cette opération est de 4,5 mm. Les panneaux ainsi obtenus, de dimension 200*200*4,5 mm³, sont mis dans une enceinte conditionnée à T = (23 ± 2) °C et à Hr = (50 ± 5) % pendant au moins 40 heures selon la norme ASTM D618-99 [123].

Pour les tests d'absorption d'eau et de gonflement, des disques sont découpés des panneaux de dimensions 50,8 mm de diamètre et 4,5 mm d'épaisseur et sont dénommés D_{IMG}. Pour les tests physiques et mécaniques, des éprouvettes sont découpées des panneaux précités. Pour les essais de traction, les éprouvettes mesurent 165 mm*19 mm*4,5 mm et sont dénommées E_{TR}. Pour les essais de flexion 3 points, les dimensions éprouvettes sont 130 mm*12,7 mm*4,5 mm et leur dénomination est E_{F3}.

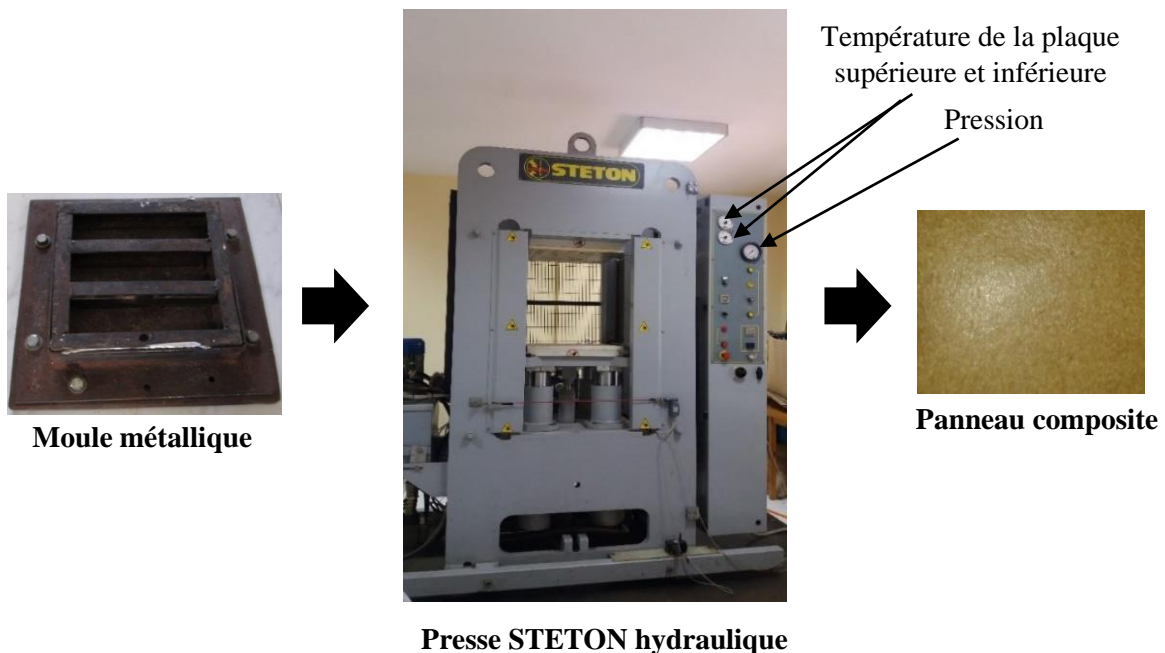


Fig.30. Moule métallique et presse hydraulique.

II.3.4. Tests d'immersion dans l'eau

Les essais d'absorption d'eau et du gonflement en épaisseur des CBP ont été déterminés conformément à la norme ASTM D570-98 [124]. Cette dernière préconise à immerger des échantillons ayant la forme d'un disque d'un diamètre de 50,8 mm et d'une épaisseur de 4,5 mm dans de l'eau. Nos échantillons préparés avec différentes formulations ont été immergés pendant 2 h et 24 h à $T = (20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Les masses et les dimensions des éprouvettes Imm après immersion ont été mesurées 20 minutes après leur retrait de l'eau.

- *Absorption d'eau*

Cette caractéristique est estimée pour chaque panneau par l'expression suivante :

$$\text{Absorption de l'eau (\%)} = \frac{M_h - M_0}{M_0} * 100 \quad (17)$$

Avec :

M_h : Masse de l'échantillon après immersion

M_0 : La masse de l'échantillon à l'état sec.

- *Densité des CBP*

La densité des CBP à l'état anhydre a été calculée par la relation suivante :

$$D_0 = \frac{M_0}{V_0} \quad (18)$$

Avec:

M_0 : Masse de l'échantillon à l'état sec

V_0 : le volume de l'échantillon avant immersion.

- *Gonflement en épaisseur*

Le gonflement des CBP a été estimé en utilisant l'équation suivante :

$$G \% = \frac{e_h - e_0}{e_0} * 100 \quad (19)$$

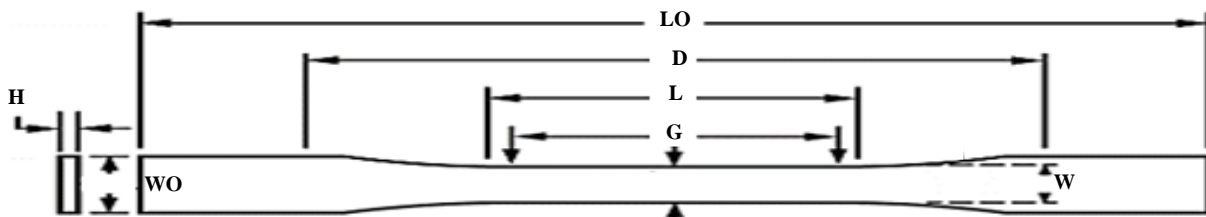
Avec :

e_h et e_0 : Epaisseurs de l'échantillon respectivement après et avant immersion.

II.3.5. Essais de traction

Les essais de traction ont été réalisés au Centre Technique des Industries du Bois et d'Ameublement (CTIBA) à Casablanca. La machine d'essais universelle utilisée à cet effet est 'Tinius Olsen H25KT avec capteur de force de 5 kN' (figure 32). Conformément à la norme ASTM D638-99 (Type I), le chargement en traction est effectué à une vitesse transversale de 5 mm/min à la température ambiante sur des éprouvettes ETR de 165 mm*19 mm*4,5 mm préalablement découpées des panneaux élaborés au CRF de Rabat. L'allongement de chaque échantillon a été mesuré sur une longueur de 25 mm à l'aide d'un extensomètre. La résistance à la traction a été calculée en divisant la charge maximale en Newton par la surface transversale minimale initiale de l'échantillon en mètres carrés. Le module d'élasticité en traction noté MOE correspond à la pente de la partie linéaire des tracés 'charge-élongation'.

Les essais sont répétés sur cinq éprouvettes de chacune des formulations et les valeurs retenues représentent la moyenne sur les 5 valeurs obtenues.



W— Largeur dans la zone de la longueur de référence	13 ± 0,50 mm
L— Longueur de la partie calibrée étroite	57 ± 0,5 mm
WO—Largeur totale	19 ± 6,4 mm
LO—Longueur totale	165 ± 6,5 mm
G— Longueur de référence	50 ± 0,25 mm
D—Écartement entre outillage	115 ± 4,5 mm
H— Épaisseur de l'éprouvette	3-7 ± 0,4 mm

Fig.31. Dimensions d'éprouvette de traction la norme ASTM D638-99 (Type I).

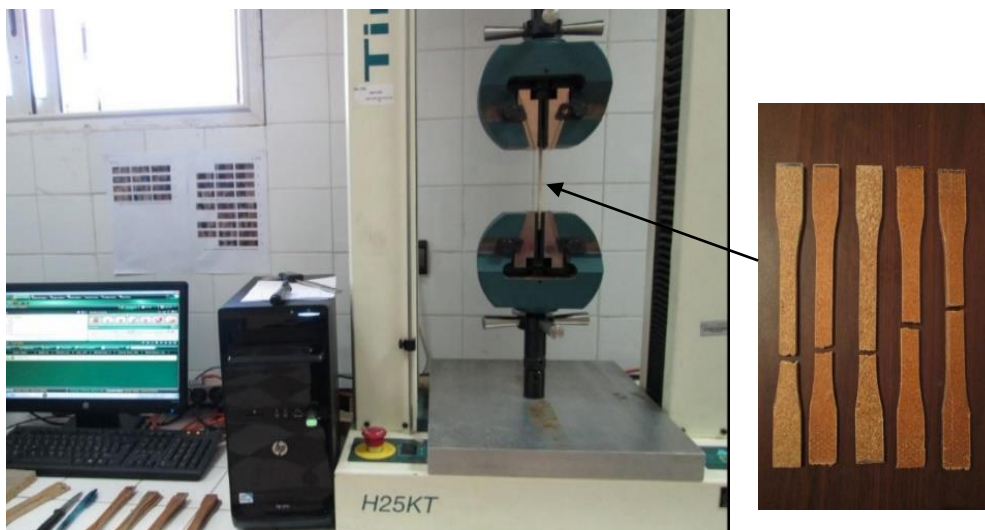


Fig.32. Essai de traction.

II.3.6. Essais de flexion 3 points

Les essais de flexion 3 points ont été mesurées, à CTIBA, à l'aide de la machine d'essais universelle 'Tinius Olsen H25ST avec capteur de force de 2,5 kN' (figure 33) en respectant la norme ASTM D790 [125]. Les essais ont été effectués à une vitesse de traverse de 2,8 mm/min, sur des éprouvettes de dimensions 130 mm*12,7 mm*4,5 mm, préalablement découpées des panneaux élaborés au CRFR à T= (23 ± 2) °C et Hr = (50 ± 5) %. Les essais sont répétés sur cinq éprouvettes de chacune des formulations et les valeurs retenues représentent la moyenne sur les 5 valeurs obtenues.

L'exploitation des courbes charge-flèche pour chaque essai permet de déterminer la résistance et le module d'élasticité en flexion en utilisant respectivement les expressions ci-après :

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2le^2} \quad (20)$$

$$E_b = \frac{L^3K}{4le^3} \quad (21)$$

Avec :

σ_f : Résistance à la flexion en N/mm², et E_b : Module d'élasticité en flexion de l'éprouvette en MPa.
 P : la charge à mi-longueur en Newton, L : la longueur de l'éprouvette en mm, l : la largeur de l'éprouvette perpendiculairement à la direction de chargement en mm et e : L'épaisseur de l'éprouvette

testée parallèlement au sens de chargement en mm et K : la pente de la partie linéaire initiale de la courbe de déviation de la charge en N/mm.

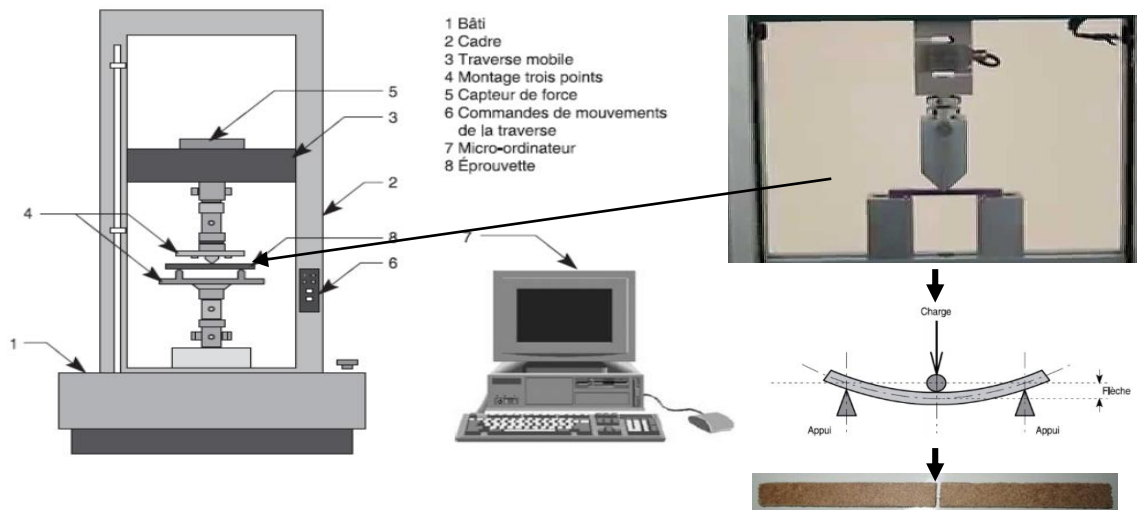


Fig.33. Essai de flexion.

II.3.7. Spectroscopie FTIR / ATR

Les mesures par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier FTIR-ATR du bois, des polymères et des CBP, sous forme de poudre, ont été enregistrées à une résolution de 4 cm^{-1} avec un spectromètre Jasco (FT/IR 4600), équipé d'un détecteur MCT. Le prisme ATR utilisé était un prisme de 45 ZnSe (figure 34).

Ces analyses ont été effectuées à la plateforme d'analyse de la Faculté des sciences de Rabat.



Fig.34. Appareil de mesure de la spectroscopie FTIR-ATR.

II.3.8. Diffraction aux rayons X

Le bois, les polymères et les CBP, sous forme de poudre, ont été analysés par diffraction des rayons X (Semen D5000) avec un rayonnement Cu K α ($\lambda = 1,54056\text{\AA}$). Afin d'identifier les phases cristallines, nous avons utilisé une plage de balayage allant de 10 à 55 avec un pas de 0,04 enregistré toutes les 5 secondes (figure 35).

Ces analyses ont été effectuées à la plateforme d'analyse de la Faculté des sciences de Rabat.



Fig.35. Appareil de mesure de la Diffraction des rayons X.

II.3.9. Microscopie électronique à balayage

Les observations en microscopie électronique à balayage MEB des CBP, sous forme de poudre, ont été réalisées sur un appareil FEI Quanta FEG 450. Le MEB fonctionne sous une tension d'accélération de 1 à 5 kV et un courant d'émission de 47 μA . Les données de balayage ont été analysées à des grossissements de 150 et 200. Dix images ont été prises et analysées pour chaque formulation de CBP. Ces observations ont été effectuées à la plateforme de l'Université Chung-Ang à la Corée du Sud.



Fig.36. Microscope électronique à balayage (MEB).

II.3.10. Angle de contact

La mouillabilité est la capacité d'un liquide à s'étendre sur une surface solide. Elle est caractérisée par l'angle de contact θ du liquide sur le solide. En pratique, le dépôt d'un liquide sur une surface solide, dans les conditions de mouillabilité statique, tend à établir un équilibre thermique, chimique et mécanique entre les phases solides, liquides et gazeuses. A l'équilibre, le liquide prend la forme d'une goutte sphérique dont la tangente à la goutte au point de contact entre les trois phases forme l'angle de contact.

Les mesures de cet angle permettent d'évaluer le caractère hydrophobe ou hydrophile d'une surface.

La mouillabilité des surfaces des CBP a été mesurée avec l'angle de contact en plaçant une gouttelette d'eau ultra pure d'environ 3 μL sur un échantillon de CBP de 1cm^2 à l'aide d'une seringue micrométrique fixée à un support et équipée d'un système de vis qui régule le dépôt de la goutte.

L'angle de contact a été mesuré en balayant le profil des gouttelettes 30 secondes après leur mise en place, à l'aide de 'CAM-200 de KSV-Finland' [126,127]. Ce dernier est relié à un logiciel d'analyse d'images qui permet de photographier l'état de la goutte et de calculer la valeur de l'angle de contact au moment de son dépôt (figure 37).

Ces mesures ont été effectuées à la plateforme de l'Université Chung-Ang à la Corée du Sud.

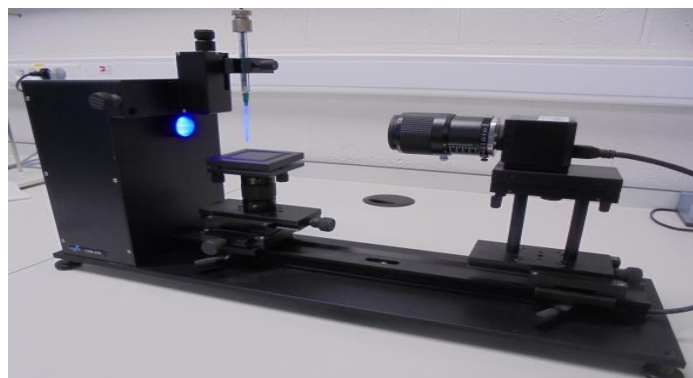


Fig.37. CAM-200 de KSV-Finland.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les critères de choix des arbres échantillons de pin maritime, leur sciage, les parties de l'arbre ayant servies à la confection des éprouvettes et des planches et les procédures de leurs séchages naturel et artificiel. Les caractérisations physiques et mécaniques du bois ont été réalisées sur les planches séchées artificiellement car elles étaient pratiquement exemptes de déformations en comparaison à celles séchées naturellement. Nous avons aussi précisé les méthodes de mesure des contraintes de croissance des arbres, de l'humidité, de la densité, de l'infra-densité de la compression axiale, de la dureté Monin.

Ensuite, le procédé d'élaboration des CBP a été présenté de même que leurs différentes formulations effectuées à température et pression constante. Il a été également précisé que les polymères ont été utilisés dans leurs états brut et recyclé avec ou sans ajout de CaCO_3 .

Dans le chapitre III, nous procédons à l'analyse des résultats obtenus par les moyens exposés dans le chapitre II avec un double objectif. Le premier vise une caractérisation du pin maritime pour valoriser cette espèce de bois marocaine car la littérature n'en fait pas état et de recycler les matériaux d'ingénierie à base de cette essence dans l'élaboration des CBP. Le second se rapporte à une recherche, par les caractérisations dimensionnelles, physique, mécanique et texturale, de la formulation offrant des propriétés optimales au CBP à base de sous-produits d'ingénierie de pin maritime et des polymères synthétiques.

CHAPITRE III

Pin maritime

Résultats et discussions des caractérisations dendrométrique, physique, et mécanique

Composite Bois-Polymère

Résultats et discussions de la Stabilité dimensionnelle et des caractérisations structurale, physique, et mécanique

Introduction

Pour tirer profit du matériau bois et en optimiser la valorisation technologique, des caractérisations physique et mécanique s'imposent. Il en est de même pour les Composites Bois-Polymère dont la qualité est, en plus, tributaire de leur stabilité dimensionnelle et de leurs propriétés texturales sans pour autant oublier les techniques de leur élaboration.

Comme nous l'avons déjà évoqué dans l'introduction générale de ce mémoire, les caractérisations physique et mécanique du pin maritime de la forêt de la Maâmora ne sont pas, à notre connaissance, traitées dans la littérature. Ceci justifie pleinement l'intérêt que nous portons à ce sujet dans notre travail et à celui que nous proposons comme valorisation aux matériaux d'ingénierie à base de cette essence, notamment dans l'élaboration des composites CBP. Notre choix s'est porté sur les polymères synthétiques à usage unique brut ou recyclé dont les problèmes écologiques sont, au vu et au su de tous, très conséquents.

Comme nous l'avons déjà précisé au chapitre II, les CPB sont élaborés avec de la poudre de pin maritime combinée soit au polyéthylène haute densité soit au polypropylène respectivement notés PEHD et PP. Ces derniers sont utilisés aux états brut et recyclé. Par ailleurs, tous les détails de collectes des matières premières examinées dans ce travail et de réalisations des mesures expérimentales sont donnés dans le chapitre II de ce mémoire et un bref rappel en sera repris au niveau de chacune des sections qui composent ce chapitre réservé aux résultats obtenus. Ainsi, dans ce chapitre, nous présentons d'abord les résultats des caractérisations dendrométrique, physique et mécanique du pin maritime et ensuite les résultats de la stabilité thermique et des caractérisations des Composites Bois-Polymère notés CBP.

III.1. Pin maritime

III.1.1. Caractéristiques dendrométriques des arbres échantillons

Le tableau 7 regroupe les mesures de quelques caractéristiques dendrométriques pour les quatre arbres notamment la hauteur totale (h_t), la circonférence à une hauteur de 1,30 m du sol ($C_{1,30}$), la circonférence à la base des arbres (C_{base}), l'épaisseur de l'écorce (E_e) et l'humidité pour les positions Nord, Ouest, Sud et Est.

D'après le tableau 7, la hauteur de l'arbre 2 est la petite et celle de l'arbre 4 est la plus grande. Il en est de même pour la circonférence de base. Une linéarité se dégage de l'évolution de la hauteur avec la circonférence de base. En revanche, la circonférence à hauteur de poitrine et l'épaisseur de l'écorce ne semblent vraisemblablement pas dépendre de la hauteur. La fertilité et la stabilité dépendent du facteur d'élancement estimé par le rapport h/d . Ce dernier étant inférieur à 70 pour les quatre arbres examinés, signifie que ceux-ci sont stables et résistants à d'éventuels risques de chablis [128]. Quant à l'humidité, elle dépend faiblement des points cardinaux et reste relativement constante pour les arbres 2, 3 et 4 cela n'est pas le cas pour l'arbre 1.

Tableau. 7 Caractéristiques dendrométriques des 4 arbres échantillon.

N° Arbre	$C_{1,3}$ (Cm)	C_{base} (Cm)	Hauteur totale (m)	Facteur d'élancement h/d 1,3 m	E_e (mm)		Humidité (%)			
					Max	Min	N	O	S	E
1	$\frac{111}{95}$	130	16,6	46,98	29,87	15,17	82,7	80,5	75,8	80,6
2	$\frac{103}{94}$	122	14,5	44,22	26,55	15,66	82,4	81,2	80,5	81
3	$\frac{106}{89}$	142	18,5	54,82	36,58	24,89	81,7	80,5	80,4	81,3
4	$\frac{114}{100}$	146	20,8	57,32	27,6	22,44	82,4	81,5	81,6	82

III.1.2. Indicateurs de contraintes de croissance (ICC)

Les mesures des indicateurs de contraintes ICC ont été effectuées par la méthode du trou unique, les arbres étant sur pied, à 1,30 m du sol en huit points à des écarts angulaires égaux suivant la circonférence.

Les valeurs des ICC et de ΔICC pour les quatre arbres sont données dans le tableau 8. Dans l'analyse de ces mesures, pour chaque arbre, nous exposons les tendances circulaires des ICC mesurés aux huit angles (figure 38), celles de leur profil centré sur la plus forte valeur des ICC (tableau 9, figure 39), celles de leur distribution en fréquence et celles de leur comparaison aux ICC calculés (tableau 10) par le modèle de Sassus [129] (annexes 2), figure 40).

Les valeurs des ICC consignées dans le tableau 10 étant négatives pour tous les arbres échantillons mettent en évidence qu'ils contiennent du bois de compression. Les arbres 1 et 3 présentent des valeurs d'ICC plus élevées que celles des arbres 2 et 4. Ces derniers peuvent être considérés relativement équilibrés comme il ressort des tracés angulaires des ICC. Ces interprétations se confirment sur le tracé du profil centré sur la plus forte valeur des ICC. Ainsi, la dissymétrie angulaire est plus ou moins marquée, la plus forte valeur des ICC étant enregistrée pour l'arbre 3 et la plus faible pour l'arbre 4.

Les arbres présentant de faibles contraintes de croissance sont mieux modélisés par la méthode de Strauss que les arbres aux fortes contraintes de croissance, ce qui dénoterait des limites du modèle de Sassus [129]. En effet, l'allure du profil calculé par ce dernier présente une symétrie parfaite et standard de part et d'autre de ICC_{max} ce qui n'est pas le cas des profils expérimentaux. A ce stade, il est possible d'explicitier le lien entre les caractéristiques dendrométriques et les ICC. A partir des données des tableaux 7 et 8, même si les ICC de trois arbres sur les quatre examinés divulgue une certaine affinité avec le rapport $h/d_{1,30}$, c'est plutôt la hauteur des arbres rapportée aux ICC ou la circonférence de base également rapportée aux ICC qui décèlent significativement bien cette affinité. Par ailleurs, en tenant compte des valeurs absolues des ICC_{max} , chaque arbre a une orientation différente de celle des autres (tableau 8). Cette indépendance de l'orientation des arbres vis-à-vis de leur ICC_{max} permettrait

d'avancer que la compression développée dans les arbres serait due à une quête d'ensoleillement et pas vraiment à une érosion par les vents.

Tableau. 8 Valeurs des ICC des arbres échantillons mesuré avant abattage.

N° Arbre	ICC (µm) à 1,3m/sol avant l'abattage								Moyenne	Min	Max	ΔICC
	Nord	Nord- -Est	Est	Sud- Est	Sud	Sud- Ouest	Ouest	Nord- Ouest				
1	-64	-80	-44	-47	-17	-35	-13	-80	-47,5	-80	-13	67
2	-14	-35	-65	-28	-43	-19	-53	-12	-33,6	-65	-12	53
3	-10	-25	-31	-71	-68	-38	-58	-93	-49,2	-93	-10	83
4	-33	-9	-19	-20	-20	-48	-9	-21	-22,3	-48	-9	39

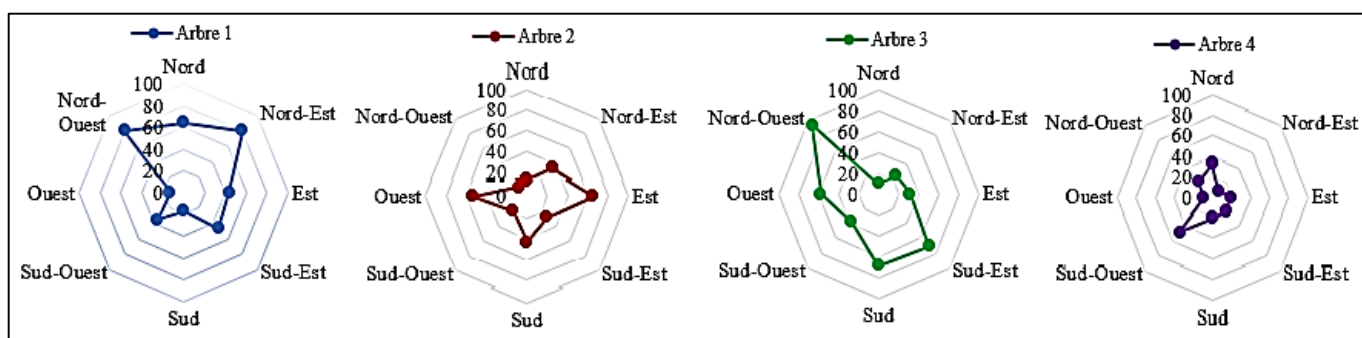


Fig.38. Représentation polaire des ICC pour les quatre arbres de pin maritime.

Tableau. 9 Valeurs angulaires des profils des ICC mesurées.

	-180	-135	-90	-45	0	45	90	135	180	Min	Max	ΔICC
Arbre 1	-13	-35	-44	-80	-80	-64	-47	-17	-13	-80	-13	67
Arbre 2	-12	-14	-35	-43	-65	-53	-28	-19	-12	-65	-12	53
Arbre 3	-10	-31	-38	-71	-93	-68	-58	-25	-10	-93	-10	83
Arbre 4	-9	-9	-20	-21	-48	-33	-20	-19	-9	-48	-9	39

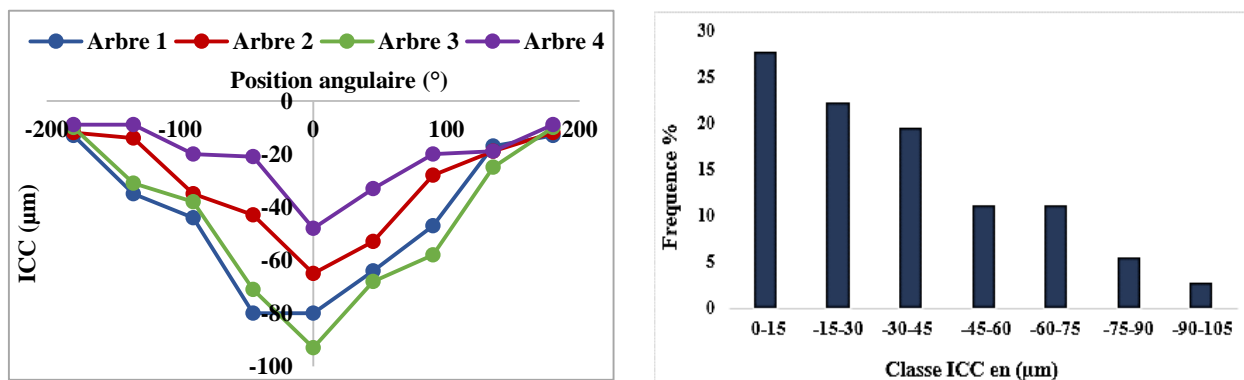


Fig.39. Profils expérimentaux des ICC pour les 4 arbres du pin maritime.

Tableau. 10 Valeurs calculées des profils d'ICC par le modèle Sassus [129].

Profils d'ICC	-180	-135	-90	-45	0	45	90	135	180	Max	Min	θ_0	$\delta\theta_0$	Max-Min
Arbre 1	-17	-21	-29	-46	-78	-46	-29	-21	-17	-17	-78	1,5	45	8
Arbre 2	-15	-18	-25	-38	-64	-38	-25	-18	-15	-15	-64	1,5	45	6
Arbre 3	-15	-20	-30	-51	-91	-51	-30	-20	-15	-15	-91	1,5	45	10
Arbre 4	-11	-14	-19	-28	-47	-28	-19	-14	-11	-11	-47	1,5	45	5

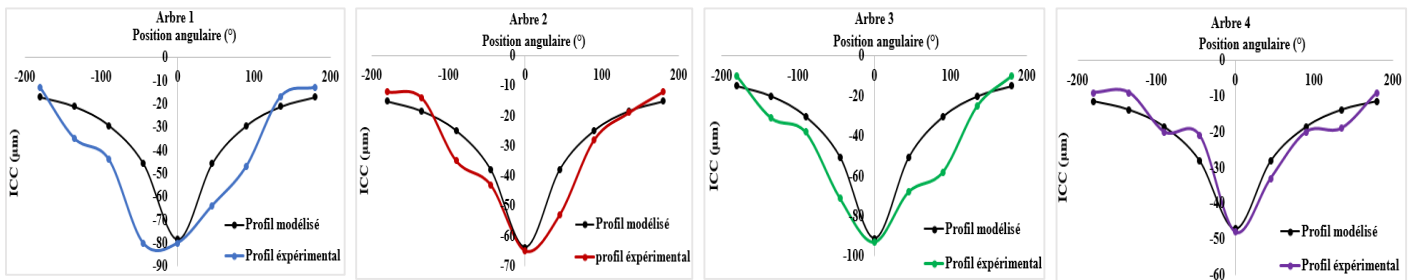


Fig.40. Profils modélisé et expérimental des ICC.

III.1.3. Rendement de sciage

La moyenne des rendements pour chaque arbre et le rendement pour chaque billon ainsi que le volume et le nombre de billon sont donnés dans le tableau 11. La figure 41, présente le rendement moyen par arbre et par billon pour chaque arbre étudié. A partir des mesures dendrométriques entreprises sur les quatre arbres du pin maritime, le rendement du sciage après délignage R_{sciage} , est de l'ordre de 58 %.

Tableau. 11 Rendement du sciage.

Arbre	Billon	$V_{\text{billon}} \text{ (m}^3\text{)}$	R_{sciage}	Moyenne
1	1	0,282	59,320	57,488
	2	0,253	57,911	
	3	0,224	53,235	
2	1	0,264	58,122	57,392
	2	0,225	57,633	
	3	0,192	55,423	
3	1	0,274	60,133	59,406
	2	0,207	56,454	
	3	0,185	56,632	
4	1	0,208	58,603	57,805
	2	0,192	56,489	
	3	0,153	54,325	

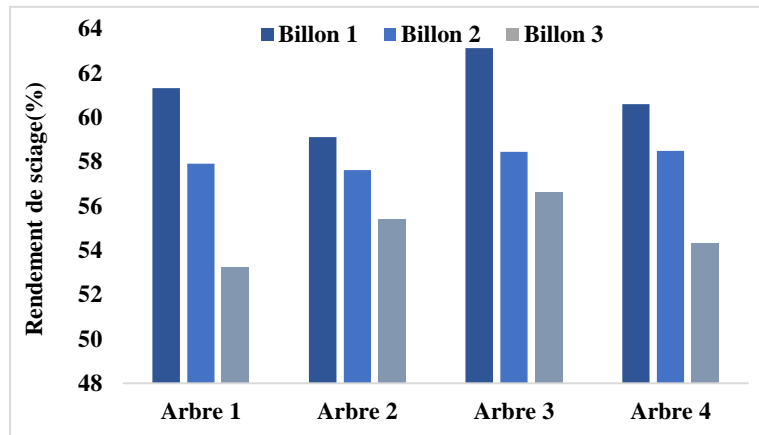


Fig.41. Histogrammes représentant le rendement moyen par arbre.

III.1.4. Caractérisation physique du pin maritime

Nous présentons dans ce qui suit les résultats des profils d'humidité et de l'infra-densité, des cinétiques des séchages naturel et artificiel, les retraits dans les principales directions du bois, le retrait total et le point de saturation des fibres.

III.1.4.1. Profils d'humidité et d'infra-densité de la première bille

La confection des éprouvettes de 20*20*20 mm³ dénommées EH et EId utilisées dans les mesures de l'humidité et de l'infra-densité est précisée dans le paragraphe II.1.6. du chapitre II. Rappelons que ces éprouvettes sont découpées du plateau diamétral des rondelles de 2,5 cm d'épaisseur (figure 42) orientées dans la direction Nord-Sud.

III.1.4.1.1. Profil d'humidité

L'évolution de l'humidité entre le bois de cœur et la périphérie pour les quatre arbres examinés est représentée sur la figure 42.

Les résultats montrent que l'humidité du bois varie significativement selon la position radiale, et ce pour les quatre arbres échantillons. Le profil diamétral de la variation d'humidité peut être scindée en deux grandes parties, une première partie où l'humidité augmente progressivement, en allant de l'extérieur vers la moelle, pour atteindre un maximum allant de 95 % à 126 % ; et une deuxième partie où l'humidité diminue au fur et à mesure où l'on va vers la moelle. Ce profil semblerait évident si l'on

songe que la première partie correspond à l'aubier et que la deuxième partie n'est autre que le duramen. L'aubier étant la partie vivante qui assure la conduction de la sève, tandis que le duramen est la partie morte qui assure de moins en moins la conduction, en parallèle avec l'évolution de la duraminisation. En effet, la progression du phénomène de la duraminisation dans le bois diminue la circulation de la sève, à cause de l'écrasement des parois cellulaires et au bouchage des punctuations. De ce fait l'aubier devait contenir plus d'eau que le duramen, mais après abattage et écorçage, les rondelles ont rapidement subi un ressuyage qui a fait que l'humidité dans l'aubier diminue de l'intérieur vers l'extérieur.

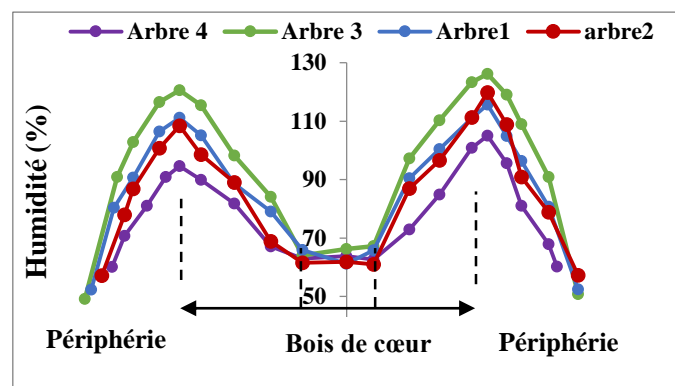


Fig.42. Eprouvettes EH et EId utilisées pour les mesures de l'humidité et d'infra-densité du bois.

III.1.4.1.2. Profil d'infra-densité

Les profils d'infra-densité des rondelles en bois de pin maritime des quatre arbres échantillons sont donnés sur la figure 43.

Les résultats indiquent également que l'infra-densité est pratiquement constante dans la zone adjacente à la moelle, et puis continue en augmentant progressivement jusqu'à atteindre le maximum au niveau de la zone de transition entre le duramen et l'aubier. Ensuite elle diminue graduellement en allant vers la zone cambiale. Les

variations radiales de la densité du bois sont le plus souvent liées à la largeur du cerne. Chez les résineux, l'augmentation de la largeur du cerne se traduit par une diminution de la densité du bois et vice-versa.

La zone à proximité de la moelle correspondrait au bois juvénile caractérisé par des cernes plus larges. Toutefois, la densité évolue aussi au prorata de la teneur en extraits, qui sont plus abondants dans le duramen que dans l'aubier. En outre, les couches externes du duramen sont toujours plus riches en extraits que les couches internes.

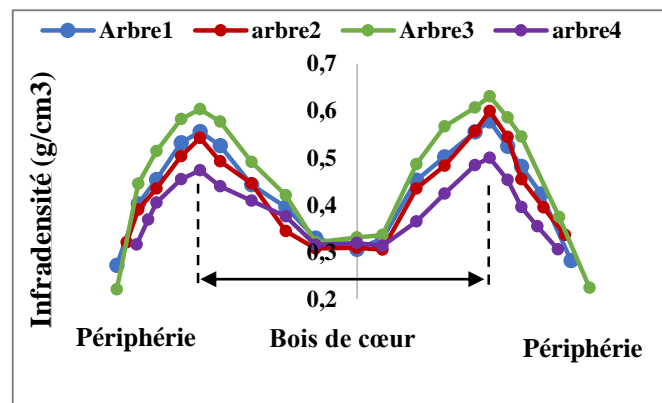


Fig.43. Profils d'infra-densité des rondelles en bois de pin maritime.

III.1.4.2. Cinétiques de séchage naturel et artificiel

La figure 44, présente la variation de l'humidité en fonction du temps des séchages naturels et artificiels, l'humidité initiale des planches étant identique. Les résultats du séchage effectués sur plusieurs planches par arbre sont données sur les figures A3.1 et A3.2 (annexes 3). Une approche macroscopique des séchages précités et de leurs modélisations sont également présentés sur la figure 44. A la fin du séchage artificiel en conditions contrôlées, macroscopiquement, toutes les planches du bois de pin maritime présentent une homogénéité apparente pratiquement exempte d'altération. En revanche, le séchage naturel, réalisé sous abri à l'air libre, conduit à l'apparition de déformations, en l'occurrence gauchissement, fissurations..., inhérentes aux nombres de paramètres intervenant dans le processus et qui ne sont pas contrôlables. Pareilles constatations sont rapportées par de nombreux travaux de la littérature [118,130] qui précisent, en plus, que le séchage artificiel du bois limiterait les déformations du bois en

comparaison au séchage naturel. Ainsi, les caractérisations mécaniques du bois de pin maritime ont été effectuées uniquement sur les planches présentant le moins de déformations en l'occurrence les planches séchées artificiellement. Nous envisageons également de procéder de même dans nos travaux à venir sur les planches séchées naturellement pour mettre en évidence l'impact des déformations macroscopiques leur caractéristique mécanique.

Les résultats indiquent, par ailleurs, que l'équilibre hygroscopique du bois nécessite au moins 90 et 50 jours pour s'établir respectivement par séchages naturel et artificiel. Les conditions de séchage artificiel semblent réduire de presque 50 % la durée de séchage. Conformément à la littérature [118], l'allure du tracé suggère un mécanisme désorption en trois phases. Le départ de l'eau libre est relatif au ressuyage, le départ de l'eau liée fait évoluer le bois vers son équilibre hygroscopique et enfin la stabilité de l'humidité, zone de superposition des tracés, où le bois atteint son équilibre hygroscopique. En condition naturelle, la perte en eau libre est de 20 % au bout de 30 jours, la perte en eau liée est de 15 % au bout de 60 jours et l'équilibre est à environ 11 % à partir de 90 jours. En condition de température et d'humidité imposées, la perte en eau libre est de 25 % au bout de 25 jours, la perte en eau liée est de 15 % au bout de 50 jours et l'équilibre est à environ 11 % à partir de 50 jours. Nous n'avons pas, dans le cadre de ce travail, examiné les paramètres déclenchant les déformations précitées mais nous sommes plutôt intéressés aux mécanismes qui régissent le séchage aussi dans les conditions naturelles qu'artificielles. Nous avons, à cet effet, procédé à l'analyse de l'évolution de l'humidité par la cinétique du séchage et par des modèles de séchage proposés dans la littérature [131]. Les régressions polynomiales d'ordre 5 et 4 semblent représenter convenablement les données de l'humidité en fonction du temps des séchages naturels et artificiels respectivement, les coefficients de corrélations étant dans les deux cas d'environ 0,997. Les formes des tracés des dérivées de l'humidité dH/dt aussi bien des planches séchées naturellement qu'artificiellement sont typiques du séchage contrôlé par les résistances externes au transfert décrite par *Sherwood* [132], la dimension des planches contribuerait en partie à cette résistance. Ces limitations probablement peu accentuées dans les conditions contrôlées que dans les conditions naturelles de séchage expliqueraient la différence du degré de polynôme de la

régression. De plus, le type de séchage ne semble pas avoir d'influence significative sur le mécanisme du séchage. En effet, indépendamment du mode, le séchage résulte de la dynamique de l'eau du cœur de la planche de bois vers la surface et de son évaporation en surface [130]. Par ailleurs, les séchages naturel et artificiel du bois de pin maritime sont modélisés (figure 44) à une constante près par le modèle de séchage proposé dans la littérature par *White et al.*, 1978 [133]. L'accord, très satisfaisant dans les conditions de séchage artificiel, l'est un peu moins dans les conditions de séchage naturel. Ce modèle, certes destiné au séchage de fine couche de matériau, ne tient pas compte de l'ensemble des phénomènes intervenant dans le séchage de grosses pièces. Néanmoins, il renseigne sur l'évolution de l'humidité dans la durée même si seule la déshydratation étant prise en compte dans le processus indépendamment des phénomènes de transferts qui lui sont associés. A ce niveau, précisons qu'une modélisation du séchage en conditions contrôlées en tenant compte des transferts aussi bien thermiques que massiques est en cours.

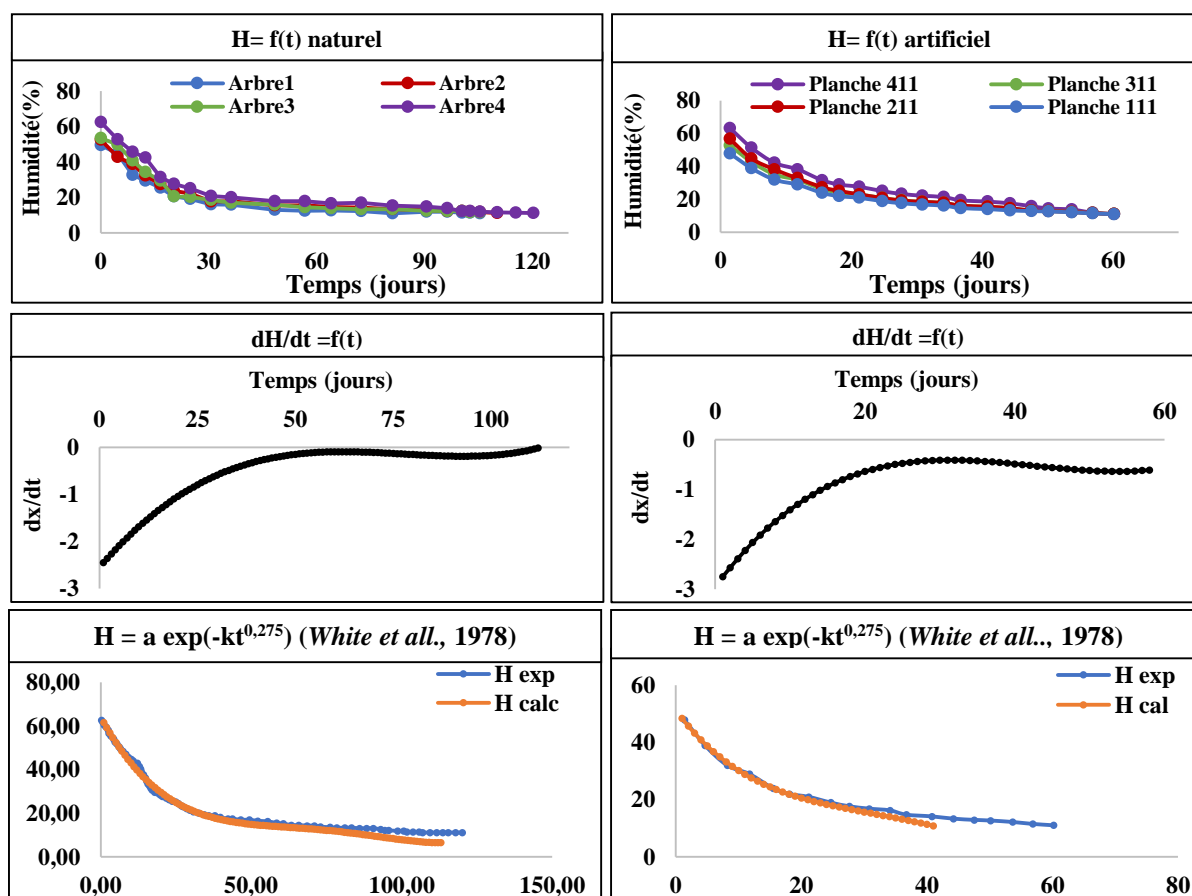


Fig.44. Evolutions des séchages naturel (à gauche) et artificiel (à droite) du bois, de leurs dérivées et de leurs modélisations.

III.1.4.3. Propriétés physiques du pin maritime

Les éprouvettes utilisées à cet effet sont dénommées Ephy. Les mesures de la densité à l'humidité 11 %, la densité anhydre, l'infra densité, les retraits volumique, tangentiel et radial et le point de Saturation des fibres pris sur un lot de 30 éprouvettes par arbre sont indiquées sur le tableau 12. Les résultats montrent que le bois du pin maritime est mi-lourd avec une densité anhydre d'environ 0,49, peu nerveux avec un coefficient de retrait volumétrique moyen de l'ordre de 0,30 %, avec un retrait volumétrique moyen de l'ordre de 13 %, anisotrope avec un coefficient de 5,23, et avec un point de saturation des fibres normal. Ces caractéristiques permettent de classer le bois de pin maritime dans la catégorie des bois mi-lourd à retrait de séchage moyennement élevé ce qui limite son utilisation en bois d'œuvre [134,135].

Tableau. 12 Propriétés physiques du bois mesurées sur 120 éprouvettes normalisées.

	Moyenne	Max	Min	CV
Humidité (%)	11	11,23	10,87	8
Densité à l'humidité 11 %	0,56	0,71	0,41	13
Densité anhydre	0,49	0,67	0,23	14
Infra-densité	0,49	0,71	0,32	12
Retrait volumétrique (%)	13,01	18,49	13,01	12
Coefficient de retrait volumétrique (%)	0.30	0,42	0,20	18
Retrait tangentiel (%)	8,02	10,67	5,52	12
Retrait radial (%)	5,23	7,77	3,01	11
Point de saturation des fibres (%)	30,2	32,13	28,03	13

Note : $CV = \frac{\sigma}{\mu} * 100$; σ : écart type ; μ : Moyenne.

III.1.4.4. Variation inter-arbres des propriétés physiques

La variation des propriétés physiques de chacun des quatre arbres échantillons est faite par la méthode des diagrammes statistiques 'Box plot' ou "boîte à moustaches". Ainsi, les mesures des propriétés physiques présentées dans les paragraphes ci-dessus sont traitées par la méthode précitée. Pour chacun des arbres examinés, une représentation graphique est faite à partir des mesures effectuées sur 30 éprouvettes. Les

résultats relatifs à la comparaison de la variabilité des propriétés des 4 arbres par cette analyse statistique sont présentés dans les paragraphes ci-après.

III.1.4.4.1. Variation de l'infra-densité

La représentation en 'box plot' de l'infra-densité des quatre arbres échantillons (figure 45 a), montre que la valeur moyenne et sa variation évolue dans le même sens que celle des valeurs absolues des ICC. Autrement dit, plus l'ICC d'un arbre est élevé, plus son infra-densité et sa variation sont élevées et vice-versa.

Tableau. 13 valeur moyenne expérimentale de l'infra densité et des ICC pour les quatre arbres.

	Arbre 1	Arbre 2	Arbre 3	Arbre 4
Infra-densité	0,51	0,45	0,55	0,45
 ICC 	43,67	31,22	44,89	20,89

III.1.4.4.2. Variation du retrait volumétrique

L'impact des ICC sur les retraits est relativement moins prononcé que celui sur l'infra-densité (figure 45 a et b). Néanmoins, la figure 45 (b) montre que les retraits volumétriques du bois de pin maritime sont proportionnels aux ICC associées.

Tableau. 14 valeurs moyennes expérimentales du retrait volumétrique et des ICC pour les quatre arbres.

	Arbre 1	Arbre 2	Arbre 3	Arbre 4
R_v	13,17	12,42	13,68	12,81
 ICC 	43,67	31,22	44,89	20,89

III.1.4.4.3. Variation du Point de saturation des fibres

Contrairement à l'infra-densité et aux retraits volumiques, le PSF des quatre arbres échantillons (figure 45 c) dépend faiblement des ICC. Les variations et les valeurs moyennes des PSF des arbres 1 et 3 sont à peine quelque peu plus élevées que celles des arbres 2 et 4.

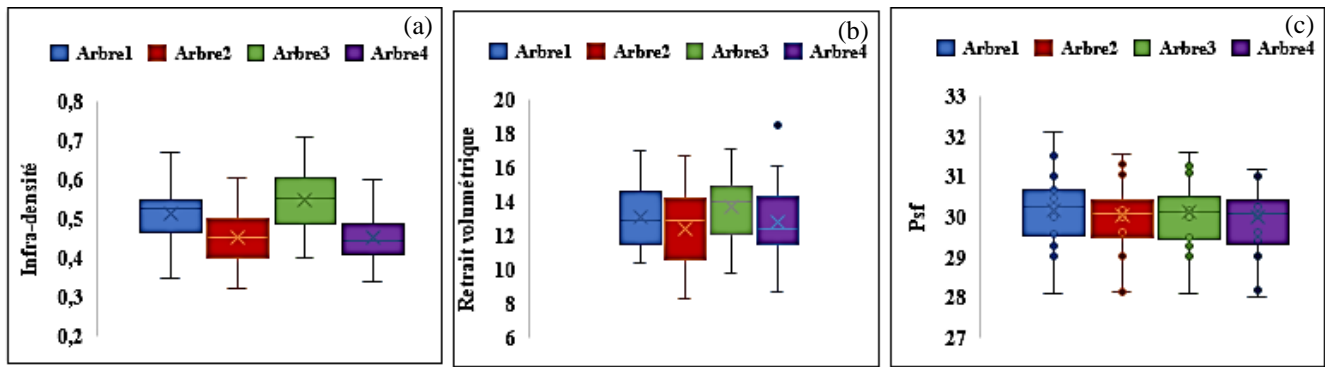


Fig.45. Variation de l'infra-densité, du retrait volumique et du PSF en fonction de la direction radiale pour chacun des 4 arbres échantillons.

III.1.5. Caractérisations mécaniques du pin maritime

Les caractéristiques mécaniques ont été effectuées sur des éprouvettes dénommées Emec de $2*2*6 \text{ cm}^3$ pour l'essai de compression axiale et de l'essai de la dureté Monnin. Concernant les mesures vibratoires, elles ont été effectuées sur les éprouvettes dénommées Evib de $2*2*36 \text{ cm}^3$.

III.1.5.1. Résistances et modules

Les valeurs du module d'élasticité Timoshenko E_d , du module de cisaillement dynamique G_d , de la résistance en compression axiale C_a , du module d'élasticité en compression axiale E_{c_a} et du Chiffre de dureté Monnin N des quatre arbres sont indiquées dans le tableau 15. Ces valeurs montrent que le bois de pin maritime est tendre avec une dureté moyenne de 1,53, rigide avec un module d'élasticité de 9,7 GPa et résistant avec une valeur en compression axiale de l'ordre de 582 kg/cm^2 [135]. Le bois de pin maritime peut ainsi être classé dans la catégorie des bois tendre, rigide et résistant [136].

Tableau. 15 Caractéristiques mécaniques moyennes du bois de pin maritime.

	Moyenne	Max	Min	CV
Module d'élasticité Timoshenko E_d (MPa)	10329	15422	6172	12
Module de cisaillement dynamique G_d (MPa)	1271	2672	469	11
Résistance en compression axiale C_a (kg/cm²)	582	953	280	13
Module d'élasticité en compression axiale E_{c_a} (MPa)	9720	18227	3247	11
Chiffre de dureté Monnin N	1,53	2,23	0,68	13

III.1.5.2. Variation inter arbre des propriétés mécaniques

Nous avons dans cette partie également opté pour l'analyse des mesures expérimentales par la méthode de 'boîte à moustache'. Les résultats qui se dégagent de cette exploitation sont donnés dans les paragraphes qui suivent et représentés sur la figure 46.

III.1.5.2.1. Variation du module d'élasticité Timoshenko

La variation de E_d et sa valeur moyenne sont plus faibles pour le bois de l'arbre 4 et plus élevées pour l'arbre 3 (figure 46 a), tendance dépendante de l'ICC de ces deux arbres. En revanche, les ICC ne semblent pas affecter la valeur moyenne de ce paramètre qui est apparemment identique pour le bois des arbres 1, 2 et 3.

III.1.5.2.2. Variation de la résistance en compression axiale

La variation la plus marquante de C_a est celle du bois de l'arbre 4 dont l'ICC est le plus faible des quatre arbres examinés (figure 46 b). Cependant, les variations de C_a du bois des autres arbres sont plus faibles que celle de l'arbre 4 et ne dégagent de ce fait pas leur dépendance avec les ICC qui leur correspondent. Par ailleurs, la valeur moyenne de C_a du bois de l'arbre 4 est vraisemblablement équivalente à celle du bois de l'arbre au fort ICC.

III.1.5.2.3. Variation du Chiffre de dureté Monnin

La variation et la valeur moyenne de la dureté de Monin du bois des arbres examinés semblent dépendre des ICC qui leur sont associées (figure 46 c). Les arbres 2 et 4 aux faibles ICC ont des valeurs de dureté plus faibles que celles des arbres 1 et 3 aux forts ICC.

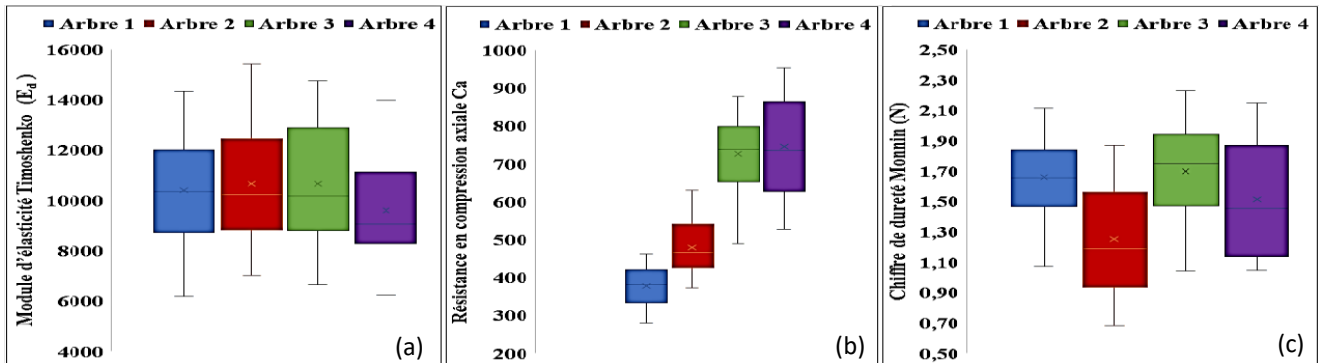


Fig.46. Variation du Module d'élasticité Timoshenko, de la résistance en compression axiale et du Chiffre de dureté Monnin pour chaque arbre.

III.1.6. Corrélations entre les propriétés mécaniques et physiques du bois

Les corrélations entre les propriétés physiques et mécaniques pour le bois des quatre arbres sont présentées sur la figure 47. Les tracés montrent que la densité à 11 % d'humidité est bien corrélée au Module d'élasticité en compression axiale, au Module d'élasticité Timoshenko, à la Résistance en compression axiale et à la dureté. Les tracés montrent qu'au fur et à mesure que la densité augmente les paramètres mécaniques étudiés augmentent également. Ces résultats indiquent que la densité a une influence majeure sur le comportement mécanique du bois. Des résultats similaires ont été soulevés par *Sassus et al., 1998* [129].

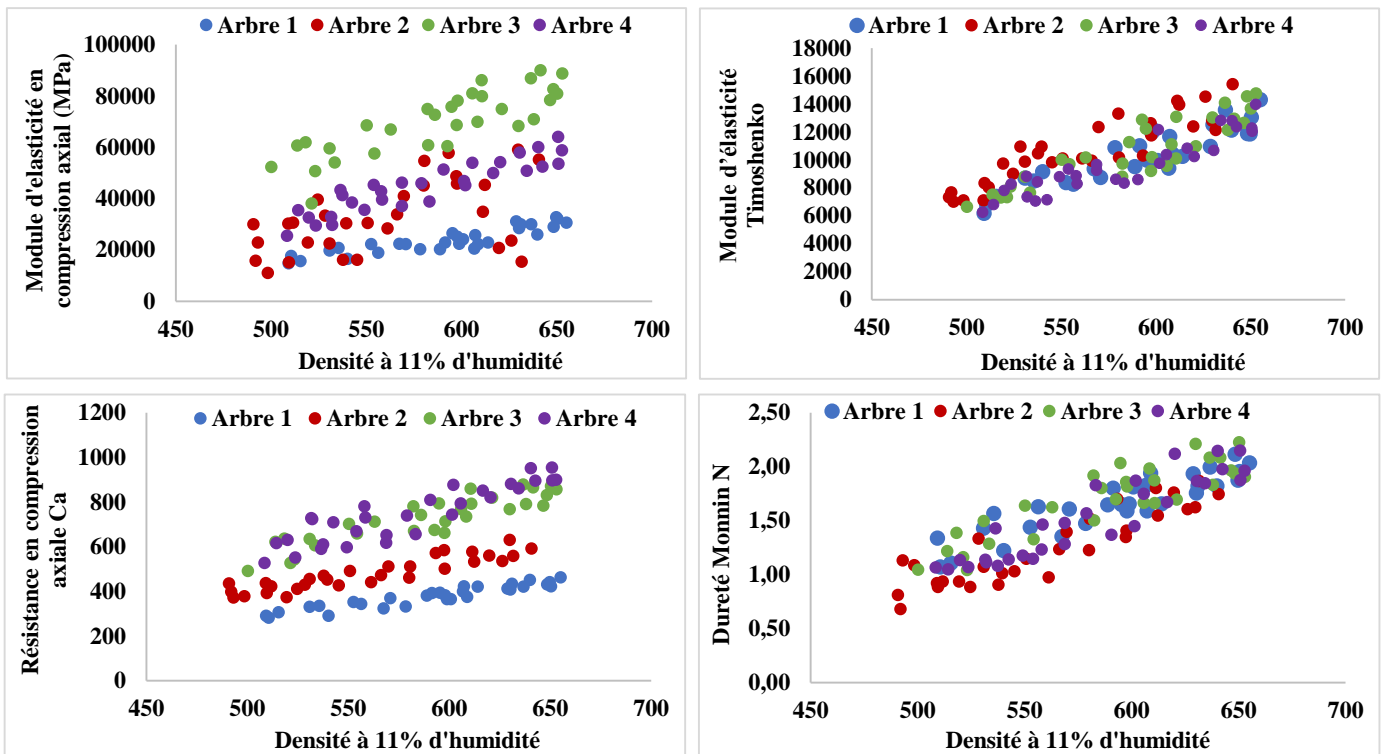


Fig.47. Evolutions du E_{ca} , du E_d , de Ca et de N du pin maritime en fonction de la densité à 11% d'humidité des quatre arbres.

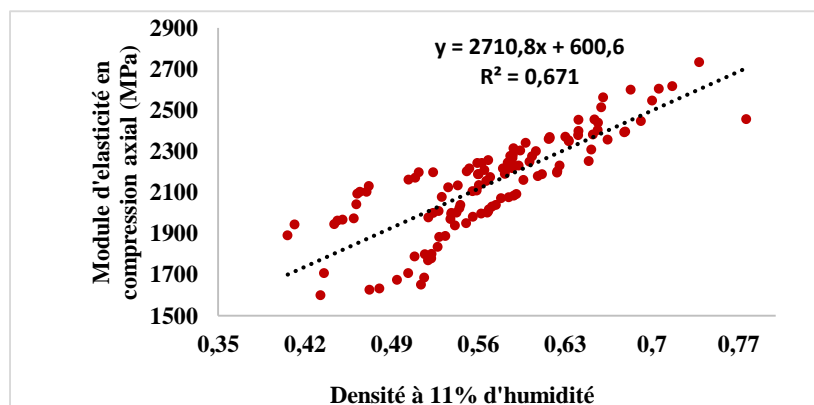


Fig.48. Evolution du module d'élasticité en compression axiale du bois de pin maritime en fonction de la densité à 11 % d'humidité pour 120 échantillons.

III.1.7. Récapitulatif sur les résultats de la caractérisation du pin maritime

Au terme des caractérisation dendrométrique, physique et mécanique du bois de quatre arbres de pin maritime provenant d'un reboisement situé à la forêt Maâmora occidentale, il est possible de noter les points ci-après.

Les mesures dendrométriques indiquent que les arbres sont stables et résistants à d'éventuels risques de chablis.

Les mesures des ICC montrent que les quatre arbres contiennent tous du bois de compression, et que les ICCmax associés ne dépendent pas de l'orientation. Les arbres présentant de faibles contraintes de croissance sont mieux modélisés que les arbres aux fortes contraintes de croissance par le modèle de Sassus. Les arbres 1 et 3 présentent un profil plus ou moins aigu alors que les arbres 2 et 4 se caractérisent par un profil quasi symétrique et plus ou moins plat.

Le rendement de sciage des grumes après délignage est de l'ordre de 58 %. Le profil de l'humidité et de l'infra-densité du bois varie significativement selon la position radiale, et ce pour les quatre arbres échantillons.

Le séchage naturel du bois donne plus de déformations des planches que le séchage artificiel. L'équilibre hygroscopique du bois nécessite au moins 90 et 40 jours pour s'établir respectivement par séchages naturel et artificiel.

Les cinétiques des séchages naturel et artificiel sont typiques du séchage contrôlé par les résistances externes au transfert et qu'elles sont relativement bien modélisées, à une constante près, par le modèle de séchage de *White et al.*, 1978 [133].

La variation inter-arbre de l'infra-densité évolue dans le même sens que celle des valeurs absolues des ICC, celle des retraits volumiques est faiblement proportionnelle aux ICC tout comme celle du PSF. La variation inter-arbre du chiffre de Monin affiche une nette dépendance avec les ICC ce qui n'est pas vraiment le cas des variations du module d'élasticité Timoshenko et la résistance en compression axiale.

Le bois des différents échantillons examinés serait, d'après les résultats de la caractérisation physique, mi-lourd, peu nerveux, à retrait de séchage moyennement élevé ce qui limite son utilisation en bois d'œuvre. Le bois des différents échantillons examinés pourrait être classé, d'après les résultats de la caractérisation mécanique, dans la catégorie des bois tendre, rigide et résistant.

III.2. Composites Bois-Polymère

Nous avons précisé au chapitre II que les CBP sont fabriqués avec de la poudre de pin maritime combinée au polymère soit vierge soit recyclé avec et sans ajout de CaCO_3 . Les détails relatifs aux différentes formulations, au procédé d'élaboration et de confection des panneaux CBP ont fait l'objet des paragraphes II.3.1., et II.3.2. du chapitre II.

Nous présentons dans ce qui suit les résultats et discussions des caractérisations physiques, mécaniques et texturales des différents CBP élaborés dans le cadre de ce travail.

III.2.1. Caractérisation physique des CBP

Ces mesures ont été effectuées sur les éprouvettes DIMG (paragraphe II.3.4., chapitre II). Les valeurs mesurées de la densité et de l'absorption d'humidité pour les CBP précités sont respectivement représentées sur les tracés de la figure 49 et répertoriées dans les tableaux A.4.1 et A.5.1 (annexes 4 et 5).

Les valeurs de ces paramètres représentent la moyenne des mesures de cinq essais répétitifs. Les mesures relatives à la saturation en eau des CBP sont données sur la figure 50.

III.2.1.1. Densité des CBP après 2h et 24h d'immersion

Les résultats de la figure 49 montrent, que la densité des composites, aussi bien ceux fabriqués avec le polymère recyclé qu'avec le polymère vierge, augmente avec l'augmentation de la teneur en bois dans le CBP. De plus, la densité en présence du polymère recyclé est plus élevée que celle en présence du polymère vierge. En revanche, la densité du CBP à base de polymère recyclé est plus faible que celle du même CBP avec ajout de 7 % en masse de l'agent de couplage CaCO_3 . Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par *Srivabut et al.*, 2018 [102].

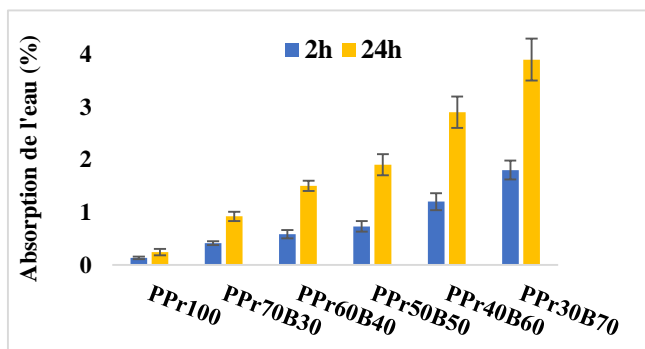
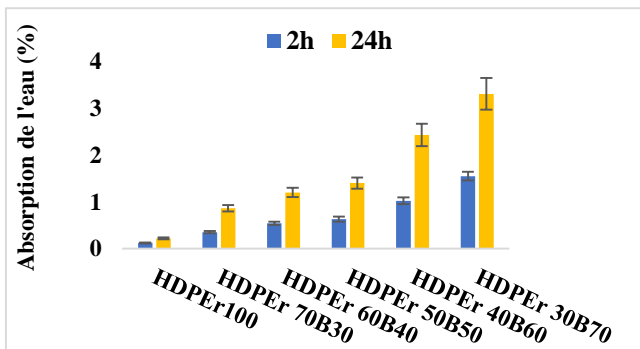
III.2.1.2. Absorption d'eau par les CPB après 2h et 24h d'immersion

Il ressort de la figure 49 que l'absorption d'eau, aussi bien pendant 2 h que pendant 24 h, augmente avec l'augmentation de la teneur en bois dans les CBP et vice versa avec la teneur en polymère. Comme c'est le cas avec la densité des CBP, l'absorption de l'eau par les CBP à base du polymère recyclé est inférieure à celle des CBP à base du polymère vierge, et ce pour les tests d'immersion dans l'eau de 2 h et de 24 h.

L'ajout de 7 % en masse de CaCO_3 dans les CBP à base du polymère recyclé conduit à une baisse significative de l'absorption de l'eau, résultat comparable aux travaux de la référence [137]. Cela peut être expliqué par le fait que les CBP à forte teneur en polymère ont moins de sites d'absorption d'eau et l'ajout de CaCO_3 réduit considérablement les interactions avec l'eau.

III.2.1.3. Gonflement en épaisseur des CPB après 2h et 24h d'immersion

L'allure des tracés du gonflement en épaisseur des CPB après 2 h et 24 h d'immersion dans l'eau (figure 49) suit une tendance similaire à celle d'absorption d'eau. Il faut noter également que la variation des valeurs du gonflement des CBP est inférieure par rapport à l'immersion dans l'eau pendant 2 h ou 24 h et que les CBP à base de PEHD présentent une absorption et un gonflement inférieurs à ceux des CBP à base de PP.



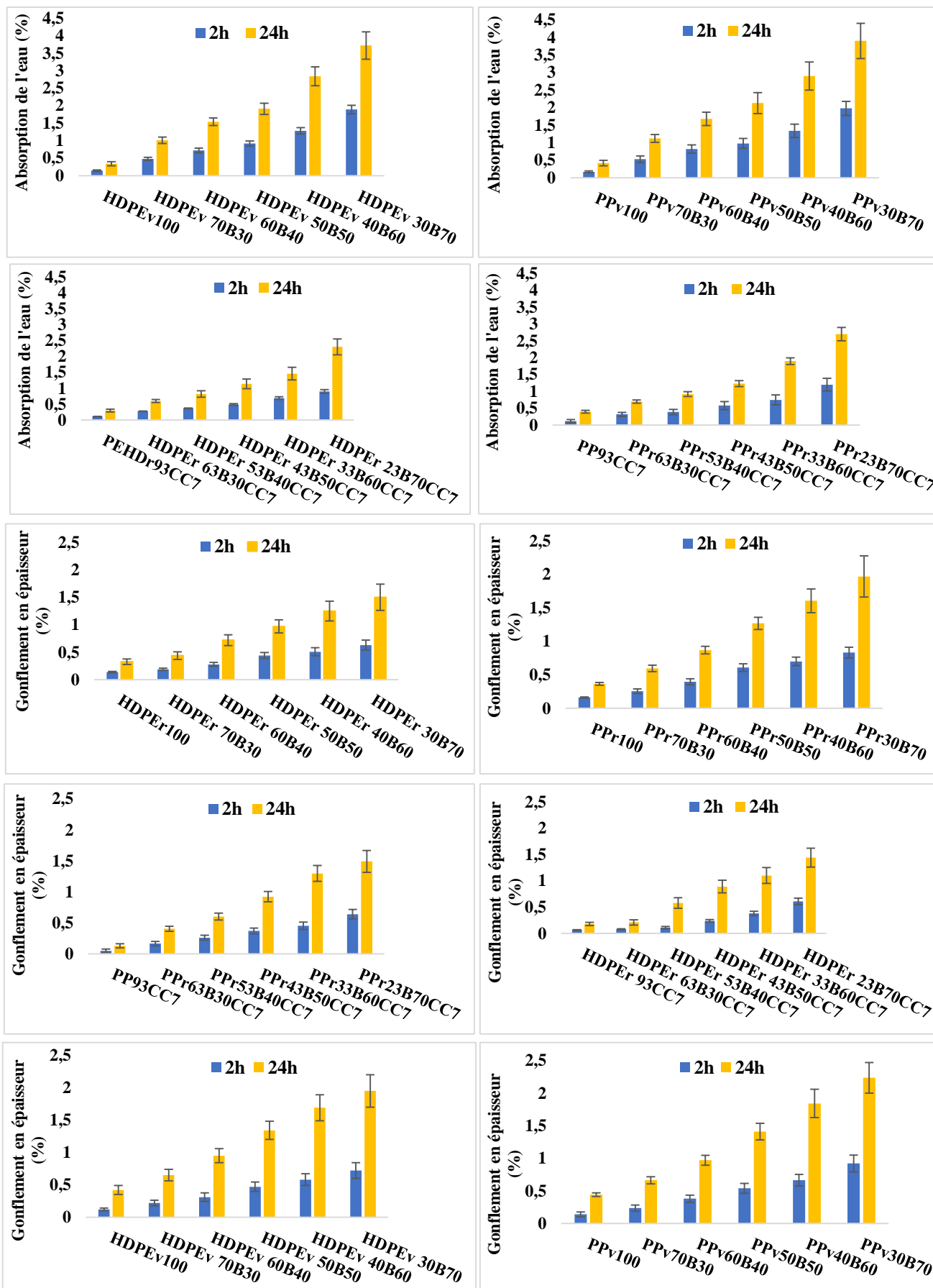


Fig.49. Absorption et gonflement pendant 2 et 24 heures des CBP examinés.

III.2.1.4. Saturation en eau des CBP

L'allure des tracés de saturation en eau des différents CBP est similaire et la saturation est atteinte au bout de 31 jours d'immersion (figure 50). D'après Adhikary et *all.*, 2008 [138], la saturation en eau résulte du remplissage de la microposité avec l'eau qui s'infiltré ensuite pour atteindre les fibres de bois. Par ailleurs, le gonflement des CBP à base de polymère vierge est supérieur à celui des CBP à base de polymère recyclé. La plus faible valeur du gonflement a été obtenue avec les CBP contenant le polymère recyclé et un ajout de 7 % de CaCO₃.

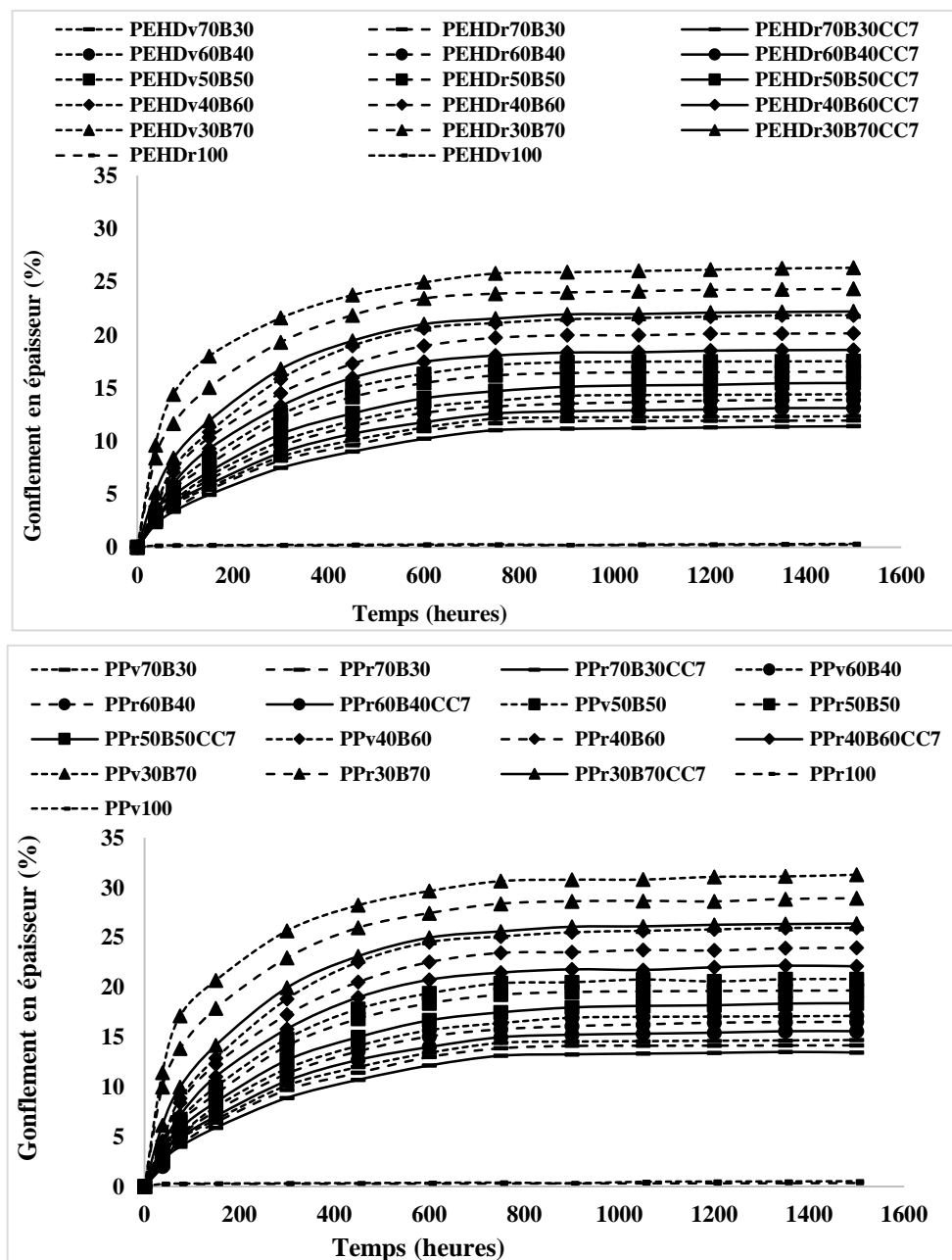


Fig.50. Gonflement en épaisseur à saturation en eau des CBP examinés.

III.2.2. Caractérisation mécanique des CBP

La caractérisation mécanique des CBP a été faite par des tests de traction et de flexions sur les éprouvettes respectivement dénommées ETR et EF₃, les normes respectives sont données aux paragraphes II.3.5 et II.3.6 du chapitre II. Les valeurs des résistances à la traction et à la flexion et les modules correspondants sont donnés dans les tableaux A.6.1 et A.7.1 des annexes 6 et 7 respectivement. Les valeurs de ces paramètres représentent la moyenne sur cinq mesures. Les évolutions de ces paramètres avec les différentes formulations des CBP examinés dans ce travail sont discutées ci-après.

III.2.2.1. Résistance et module de traction

Les résultats des essais de traction sont donnés dans les tableaux A.6.1 et A.7.1 (annexes 6 et 7), et représentés sur la figure 51. L'analyse globale de cette dernière indique que la résistance et le module à la traction évoluent en sens inverse lorsque le CBP se concentre en bois. En effet, quand le contenu du bois dans le CBP croît, la résistance diminue alors que le module augmente. Toujours à partir de la figure 51, la résistance à la traction est à sa valeur maximale avec les CBP exempts en bois tandis que le module est à son minimum. Par ailleurs, aussi bien pour la résistance que pour le module, leurs valeurs sont plus élevées pour les CBP à base de polymère recyclé en comparaison au polymère vierge. Ceci serait lié au fait que le poids moléculaire du polymère recyclé est supérieur à celui du polymère vierge d'après *Adhikary et al.*, 2008 [138]. De plus et comme c'est le cas pour le module de traction, la résistance des CBP élaborés avec le polymère recyclé et CaCO₃ est supérieure à celle des CBP fabriqués avec le polymère recyclé. Par ailleurs, toute proportion gardée, la résistance et le module des CBP contenant le PP est plus faible que celle des CBP contenant PEHD [139]. Comme il est indiqué précédemment, le polymère recyclé, en comparaison au polymère vierge, conduit à des valeurs élevées de la résistance et du module de traction. Ceci serait probablement dû à la meilleure cohésion des fibres de bois au sein de la matrice polymère recyclé [140]. Cette cohésion serait facilitée par l'incorporation éventuelle d'impuretés chimiques lors du traitement de recyclage ou par le changement de

cristallinité de la matrice polymère lorsque le contenu en bois augmente dans le CBP [138]. Enfin, l'amélioration de la résistance et du module à la traction par ajout de CaCO_3 au CBP serait attribuée à une meilleure liaison interfaciale entre la poudre de bois et la matrice polymère [102].

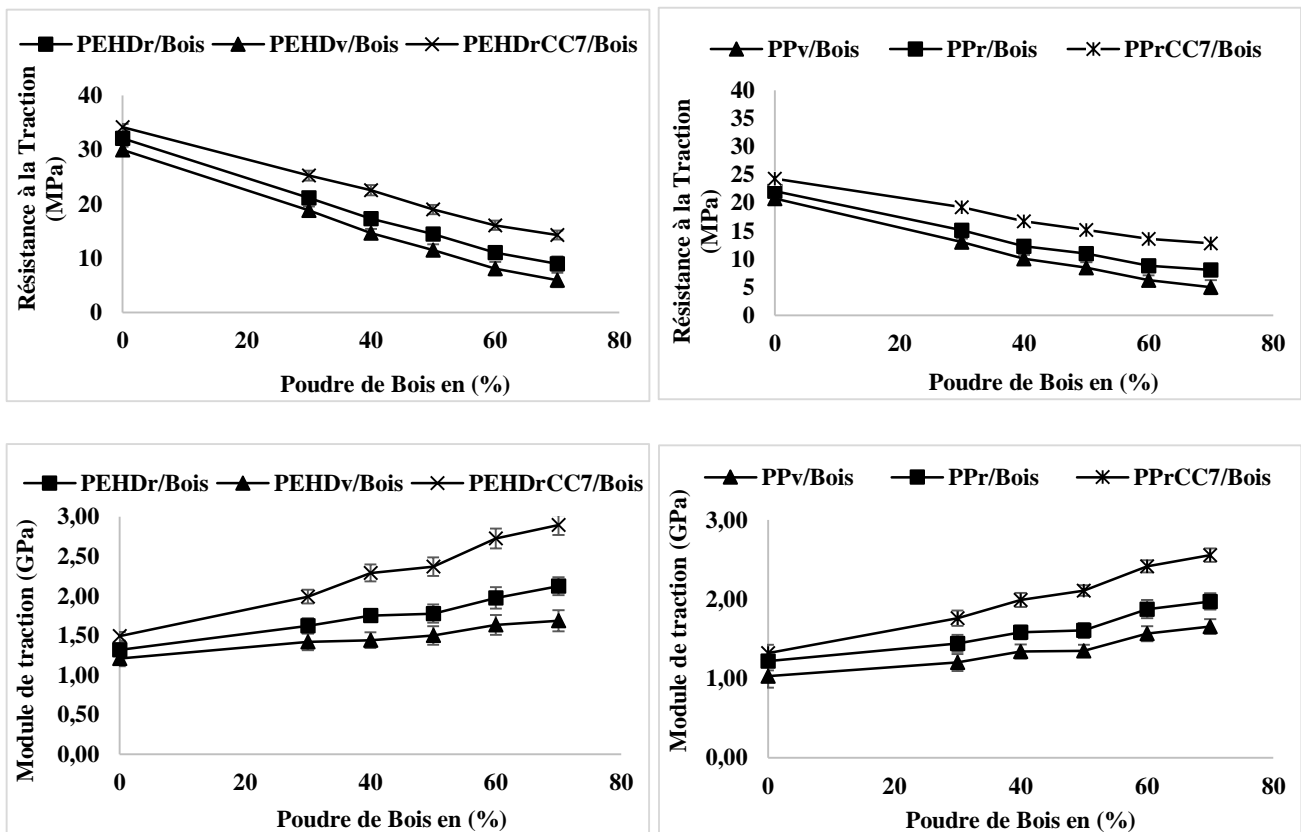


Fig.51. Résistance et module de traction des différents CBP.

III.2.2.2. Résistance et module en flexion

Les résultats des essais en flexion 3 points sont donnés dans les tableaux A.6.1 et A.7.1 (annexes 6 et 7) et représentés sur la figure 52. Comme c'était le cas en traction, l'évolution des tracés de la figure 52 montre que la résistance et le module en flexion évoluent en sens inverse lorsque le CBP se concentre en bois. En effet, quand le contenu du bois dans le CBP croît, la résistance diminue alors que le module augmente. Ces tendances sont en accord avec les travaux de *Salih et al., 2013* [141].

De plus, nos résultats montrent que la résistance et le module en flexion des CBP à base de polymère recyclé sont légèrement supérieurs à ceux fabriqué à base de polymère vierge pour la même formulation de CBP. Notons aussi que la résistance et le

module en flexion des CBP élaborés avec du PEHD sont supérieurs à ceux fabriqués avec du PP. L'ajout de CaCO_3 dans les CBP améliore la résistance et le module à la flexion en comparaison au CBP qui n'en contiennent pas [142].

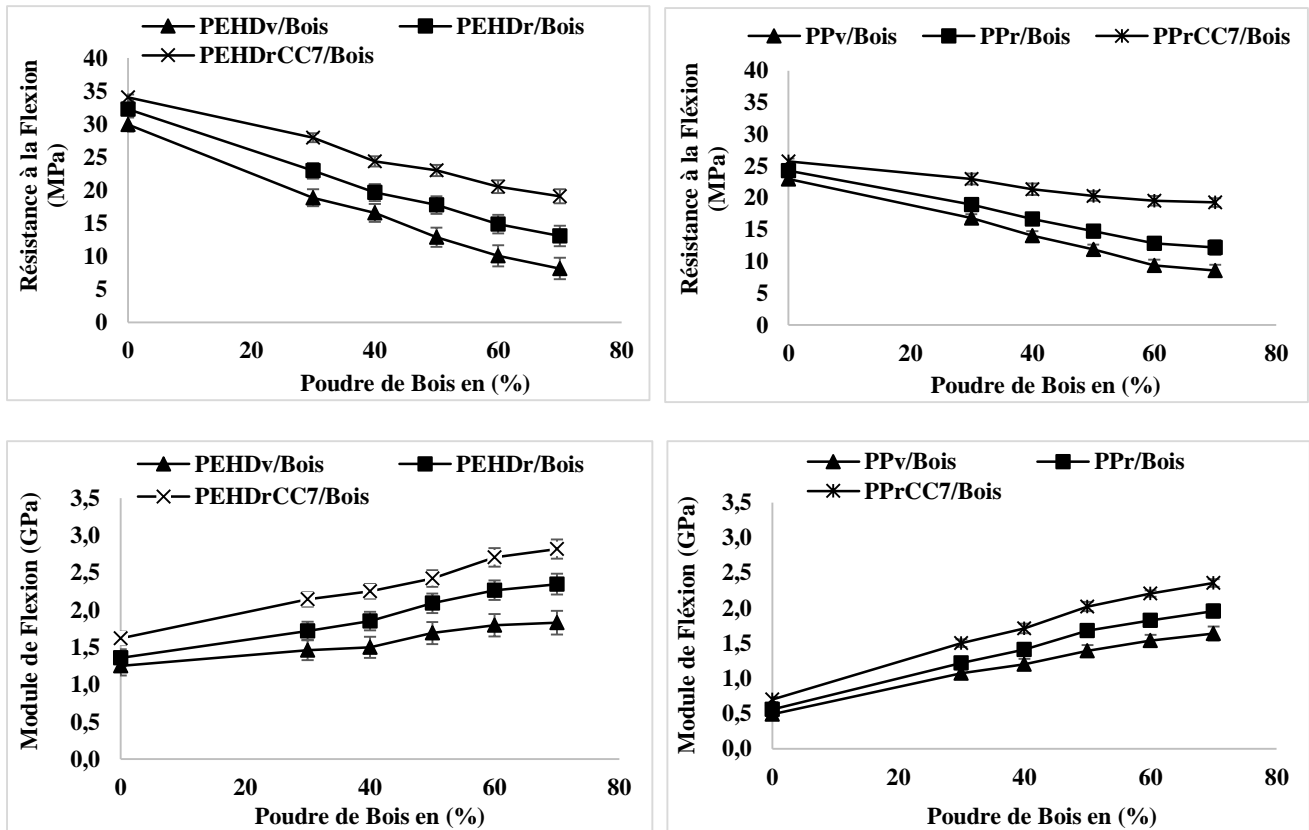


Fig.52. Résistance et module en flexion des différents CBP.

III.2.3. Caractérisations spectrale et microscopique des CBP

Les groupements fonctionnels de surface, la cristallinité, la morphologie et la mouillabilité du bois, des polymères et des différents CBP ont été mis en évidence respectivement par infra-rouge, par diffraction aux Rayons X, par microscopie électronique à balayage et par angle de contact.

III.2.3.1. Caractérisations infra-rouges du bois, des polymères et des CBP

Les spectres de l'analyse FTIR / ATR du bois de pin maritime, du CaCO_3 , du PEHD et du PPr sont donnés sur la figure 53, ceux des différents CBP sur la figure 54.

III.2.3.1.1. Analyse du spectre du bois

Le pic à 3335 cm^{-1} (figure 53), situé dans une large bande d'absorption s'étendant de 2960 et 3730 cm^{-1} , correspond aux vibrations d'élongation de la liaison O-H.

L'épaule à 1600 cm^{-1} représenterait le mode de vibration δ (OH) d'une molécule d'eau isolée en l'occurrence l'eau libre. Différentes liaisons hydrogène seraient à l'origine de l'élargissement de la bande O-H dans les spectres FTIR/ATR [143]. Ceci indique la présence des structures aromatiques et des composés phénoliques et alcooliques qui correspondent à la lignine et à la cellulose [144]. Le pic à 2891 cm^{-1} , entre 2914 et 2845 cm^{-1} , correspond à la vibration d'élongation asymétrique de la liaison C-H [145].

La bande située entre 1633 et 1508 cm^{-1} est attribuée aux vibrations d'étirement benzène est relative des groupes aromatiques [146]. De plus, le pic à 1262 cm^{-1} est attribué à la vibration C-O des groupements méthoxyle de la lignine.

Le pic à 1026 cm^{-1} correspond aux vibrations de valence des liaisons C-O et C-O-C de la cellulose [145], et le pic à 894 cm^{-1} au groupement C-H de la cellulose [147,148].

III.2.3.1.2. Analyse du spectre de CaCO_3

Le spectre de ce constituant (figure 53) se compose de trois bandes d'absorption placées à 1400 , 875 , 712 cm^{-1} . La première est large et intense, la deuxième fine et intense et la troisième fine et faiblement intense comparée aux précédentes. Ces trois bandes révèlent les trois des modes d'élongation C-O du groupement carbonate [149].

III.2.3.1.3. Analyse du spectre de PEHDr

Contrairement au bois, le spectre infrarouge du PEHDr (figure 53) ne comporte que quelques bandes de par sa composition simple. La large bande dont le pic se situe à 3335 cm^{-1} est relative aux vibrations OH antisymétriques et symétriques : $\nu_a(\text{OH})$ et $\nu_s(\text{OH})$. Ces bandes révèlent l'existence d'eau liée dans la structure du polymère

[78,150]. A 1600 cm^{-1} , un pic de faible intensité serait dû, d'après Kusanagi et Yukawa [78], au mode de vibration δ (OH) d'une molécule d'eau isolée autrement dit d'eau libre. L'intensité de cette bande est plus importante pour le PEHDr que pour le PPr.

Les pics 2915 cm^{-1} et 2847 cm^{-1} sont attribués aux vibrations d'étirement asymétrique et symétrique, respectivement du groupe $-\text{CH}_2-$ [151]. Le doublet à 1475 cm^{-1} est caractéristique d'une déformation angulaire de la liaison C-H, le pic à 2847 cm^{-1} de l'élongation symétrique de CH_2 et le pic 2923 cm^{-1} de l'élongation asymétrique du groupement CH_2 [151,152].

Les pics à 730 et 712 cm^{-1} sont attribués à la cristallinité du PEHDr [153].

III.2.3.1.4. Analyse du spectre de PPr

Comparé au PEHDr, le spectre du PPr (figure 53) est plus fourni en pics. La bande relative au groupement hydroxyle est moins prononcée que celle du PEHDr. Les autres pics présents sur le spectre du PPr sont associés aux différentes vibrations d'étirement des groupes méthyle et méthylène [154].

La bande s'étendant de $2990-2700\text{ cm}^{-1}$, présente quatre pics 2949 , 2916 , 2866 et 2836 cm^{-1} sont respectivement associés au CH_2 asymétrique [155].

La bande observée à $1500-800\text{ cm}^{-1}$ présente plusieurs pics, ceux à 1454 et 1374 cm^{-1} sont attribués au CH_3 en flexion asymétrique et symétrique.

Le pic observé à 1358 cm^{-1} est relatif aux vibrations de flexion du CH et du CH_2 . Les pics à 1166 et 1041 cm^{-1} sont affectés à la vibration d'étirement de la chaîne C-C et la vibration de flexion C-H et de balancement CH_3 . D'après *Stark et al., 2007* [156], concernant la vibration d'étirement de la chaîne C-C, deux liaisons squelettiques sont en contraction tandis qu'une liaison C- CH_3 est en extension.

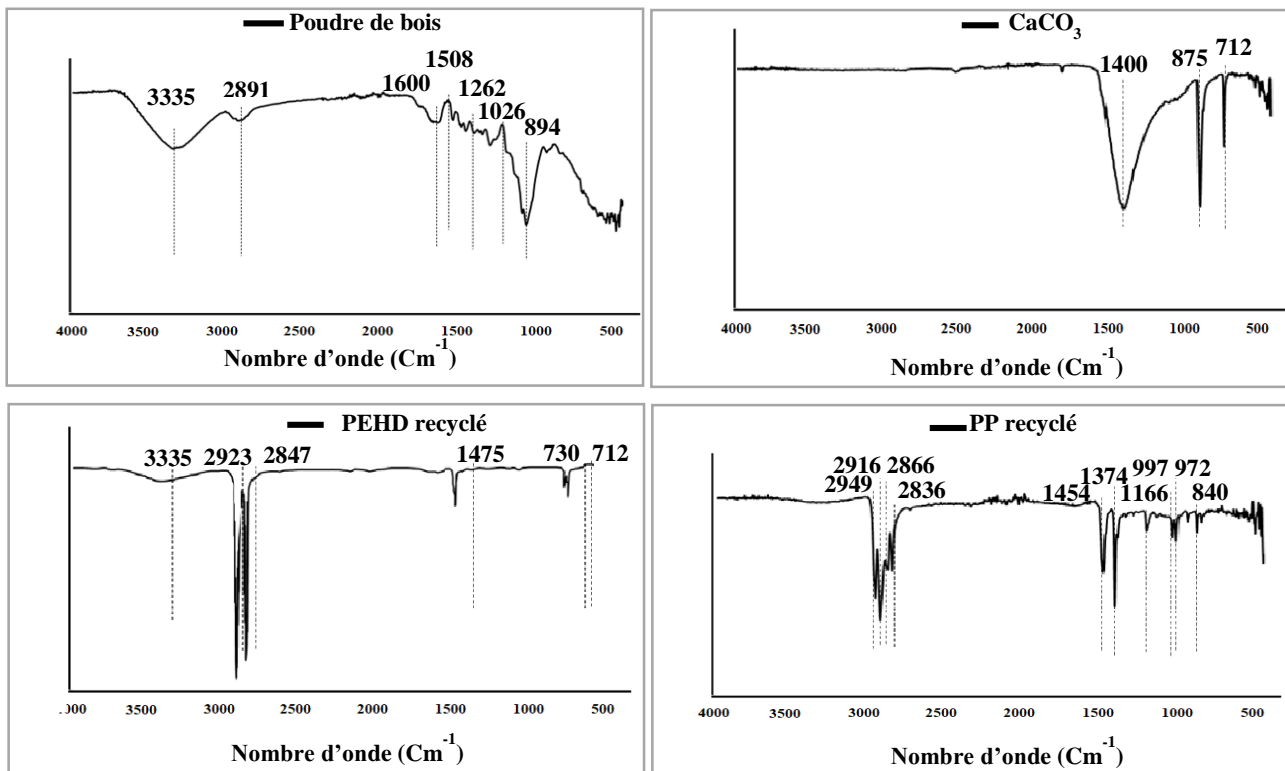


Fig.53. Spectres FTIR / ATR du bois, du CaCO₃, du PEHDr et du PPr.

III.2.3.1.5. Analyse des spectres des CBP

Sur les spectres de la figure 54, le pic à 3335 cm⁻¹ est attribué aux vibrations d'étirement des groupes hydroxyle bois-PEHDr ou bois-PPr. L'intensité de ce pic devient nettement plus faible probablement à cause de la diminution du nombre de groupes hydroxyle dans le bois conséquence de l'augmentation de la teneur en Polymère recyclé dans le CBPr. En d'autres termes, le polymère à des teneurs plus élevées peut envelopper les particules de bois, ainsi les groupes hydroxyle sont progressivement masqués par l'augmentation des particules de polymère. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par *Baldock et al., 2002* [157]. Par ailleurs, les pics infrarouges de tous les CBPr examinés restent inchangés. Il n'y aurait vraisemblablement pas d'interactions chimiques entre les groupements fonctionnels des polymères et ceux du bois et l'interaction serait donc de nature physique. L'ajout de CaCO₃ dans les CBPr se manifeste sur les spectres infra-rouges par la présence du pic relatif au groupement C-O dont l'intensité est faible. Cette dernière est probablement due au faible pourcentage de CaCO₃ qui ne dépasse de 7 % en poids dans les différents composites.

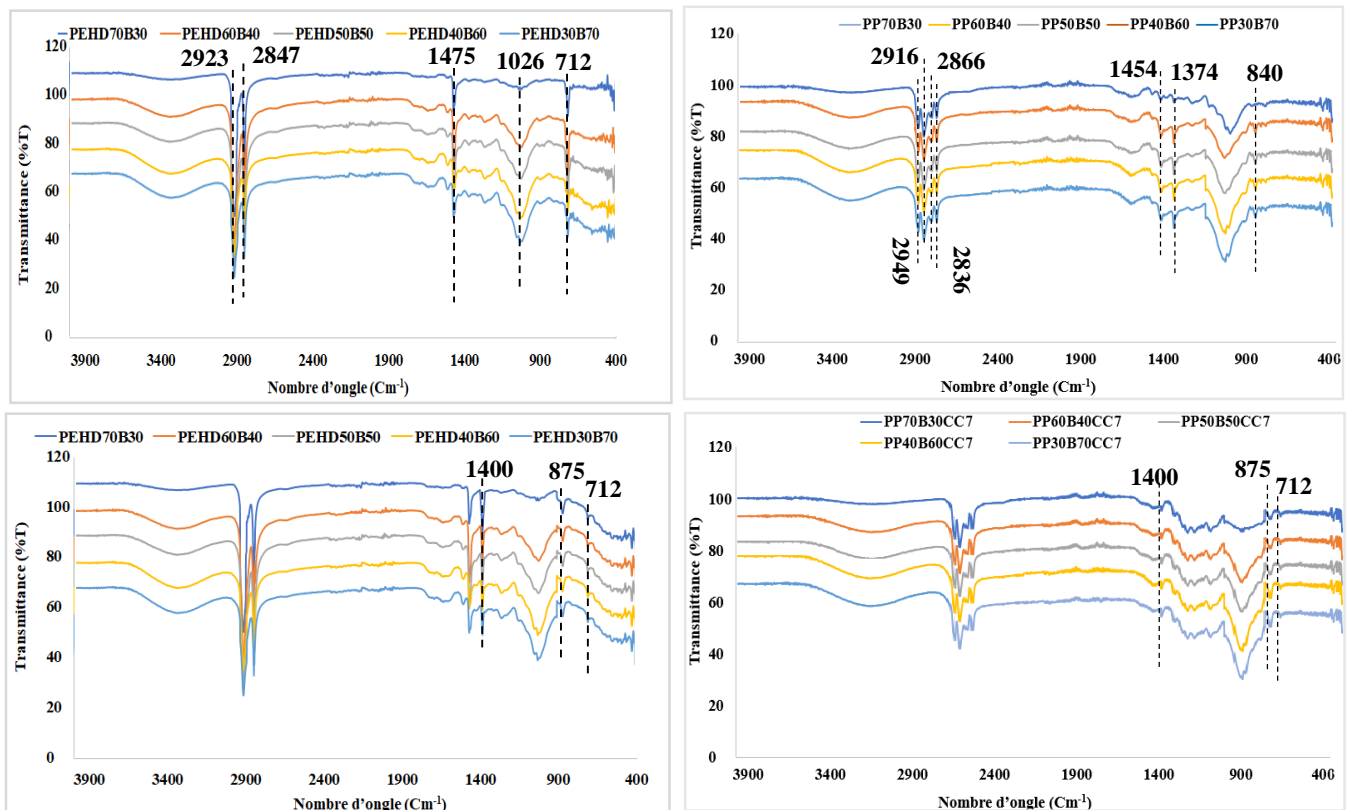


Fig.54. Spectres FTIR / ATR des CBPr avec ou sans CaCO₃.

III.2.3.2. Angle de contact

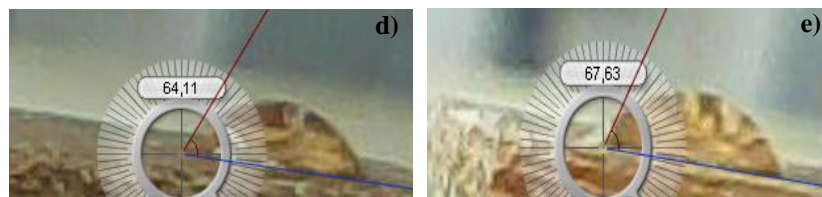
Les photos prises lors des mesures des angles de contact statique de l'eau par la méthode de la goutte sessile sur les surfaces des CBPr examinés dans ce travail sont données sur la figure 55.

Les angles de contact mesurés et ceux calculés sont donnés sur tableau 16 (les détails du calcul sont donnés dans les tableaux A.8.1, A.8.2, A.9.1 et A.9.2 (annexes 8 et 9 respectivement) et représentés ensuite sur la figure 56. Les résultats indiquent que la surface des CBPr contenant une teneur élevée en PPr indique un comportement en hydrophobie élevée que celui du CBPr avec la même teneur en PEHDr (annexes 8). Ce comportement découle probablement de la présence du polymère à la surface du CBPr. Cependant l'angle de contact décroît considérablement lorsque la teneur en bois est beaucoup plus grande que celle du polymère dans le CBPr, fait probablement attribuable à l'hydrophilie du bois. Le même comportement a été observé par *Sunilkumar et al., 2012* [158], en estimant l'angle de contact du polyéthylène basse densité chargé avec du chitosane. La diminution des valeurs de l'angle de contact lors de l'augmentation de la

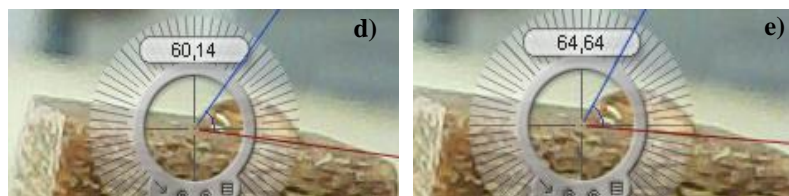
charge avec du chitosane a été attribuée à l'augmentation de la nature hydrophile des échantillons chargés en chitosane, cette hypothèse a été confirmée en comparant des échantillons non plastifiés et plastifiés, celui-ci présente une hydrophilie supérieure.

Par ailleurs, l'ajout de 7 % de CaCO_3 a provoqué une augmentation de la valeur de l'angle de contact pour les mêmes formulations des CBPr (figure 55). Cela est probablement dû à la présence du carbonate de calcium CaCO_3 sur la surface des composites [159].

Enfin, les angles de contact calculés sont comparables à ceux mesurés (tableaux 16), ce qui signifie que l'expression proposée pour le calcul de l'angle de contact donne des résultats proches de l'expérience.



Angles de contact de l'eau (a) PEHDr 30W70 (b) PEHDr 40W60 (c) PEHDr 50W50 (d) PEHDr 60W40 (e) PEHDr 70W30.



Angle de contact de l'eau (a) PPr30B70 ; (b) PPr40B60 ; (c) PPr50B50 ; (d) PPr60B40 ; (e) PPr70B30.

Fig.55. Angles de contact des différents CBP.

Tableau.16 Angles de contact mesurés et calculés des CBP.

CBPEHDr	θ_m	θ_c	CBPPr	θ_m	θ_c
Pr70B30	67,63	68,12	Pr70B30	64,03	65,14
Pr60B40	64,11	65,14	Pr60B40	60,14	60,51
Pr50B50	53,76	56,78	Pr50B50	49,73	51,28
Pr40B60	49,02	51,28	Pr40B60	45,82	45,13
Pr30B70	33,97	34,37	Pr30B70	29,07	31,89
Pr70B30CC7	69,95	70,43	Pr70B30 CC7	66,48	67,38
Pr60B40 CC7	66,26	67,38	Pr60B40 CC7	63,85	63,73
Pr50B50 CC7	55,84	56,14	Pr50B50 CC7	53,26	53,73
Pr40B60 CC7	52,88	53,13	Pr40B60 CC7	47,38	47,64
Pr30B70 CC7	35,06	36,86	Pr30B70 CC7	33,11	33,85

θ_m : angle de contact mesuré, θ_c : angle de contact calculé = $2 * \text{Arctg}(2h/d)$

Les valeurs de h et d utilisés dans les calculs de θ sont données dans les annexes 8 et 9.

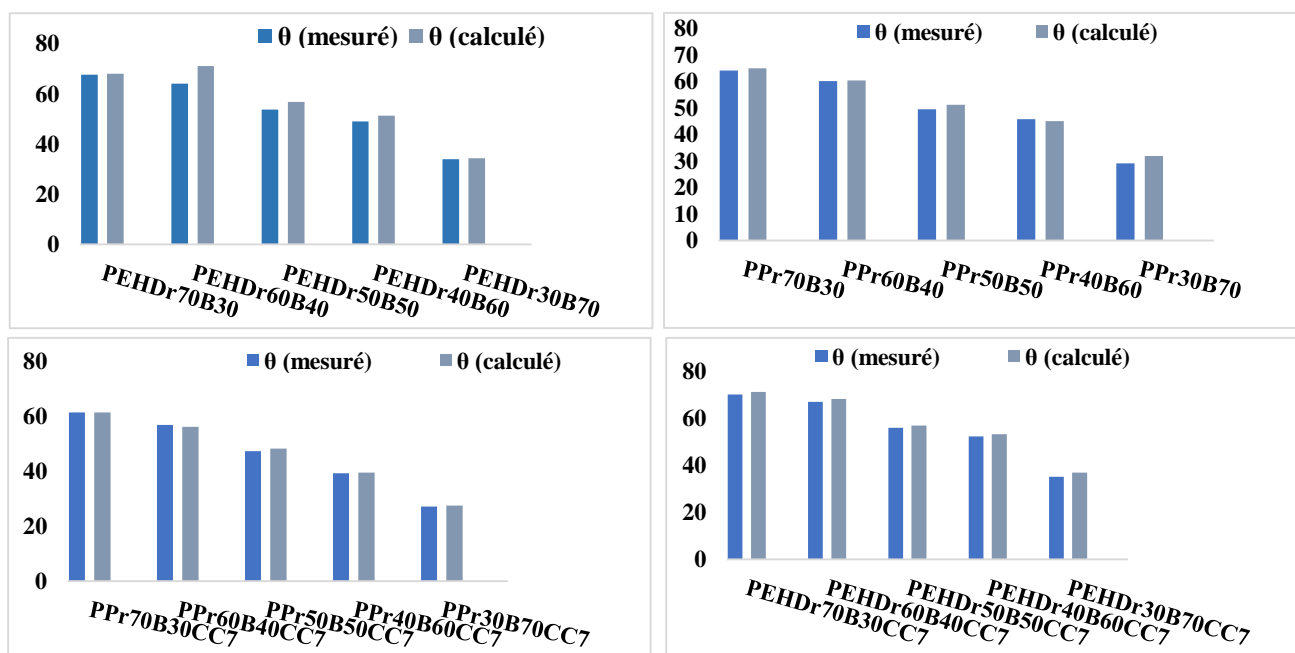


Fig.56. Angles de contact de l'eau mesurés et calculés pour les CBP.

III.2.3.3. Diffractions des rayons X

Les diffractogrammes des poudres de bois, de CaCO_3 , du PEHDr et du PPr sont regroupés dans la figure 57, ceux des différents CBP sur la figure 58. La description de ces diffractogrammes est faite dans les paragraphes ci-après.

III.2.3.3.1. Diffractogramme du bois

Les pics présents sur le diffractogramme du bois (figure 57) sont associés aux plans cristallins de la cellulose d'après *Sena Neto et all., 2013* [160] et *Poletto et all., 2012* [161]. Les pics de diffraction 2θ situés de 14 à 17° et à $22,3^\circ$ et $37,72^\circ$ révèlent l'existence de la forme native de la cellulose, caractéristique des matières lignocellulosiques. La réflexion à 2θ comprise entre 18 et 20° est affectée à la phase amorphe [162].

III.2.3.3.2. Diffractogramme du CaCO_3

La plus forte intensité de la bande cristalline caractéristique du carbonate de calcium CaCO_3 a été observée à $2\theta = 29,34^\circ$ (figure 57) tandis que les bandes de faibles intensités ont été observées à $2\theta = 23,02^\circ$, $2\theta = 35,95^\circ$, $2\theta = 39,39^\circ$ [163].

III.2.3.3.3. Diffractogramme du PEHDr

Les bandes cristallines caractéristiques du PEHDr (figure 57) ont été observées à plusieurs réflexions [164] :

- Bandes de fortes intensités qui sont $2\theta = 21,4$, $2\theta = 24,0^\circ$, $2\theta = 35,0^\circ$;
- Bandes de faibles intensités qui sont $2\theta = 20,0^\circ$.

III.2.3.3.4. Diffractogramme du PPr

Les bandes cristallines caractéristiques du PPr (figure 57) ont été observées à plusieurs réflexions [165, 166] :

- Bandes de fortes intensités qui sont $2\theta = 13,94^\circ$, $2\theta = 16,76^\circ$, $2\theta = 18,42^\circ$, $2\theta = 21,06^\circ$, $2\theta = 21,64^\circ$ et $2\theta = 37,74^\circ$;
- Bandes de faibles intensités qui sont $2\theta = 25,32^\circ$ et $2\theta = 28,16^\circ$.

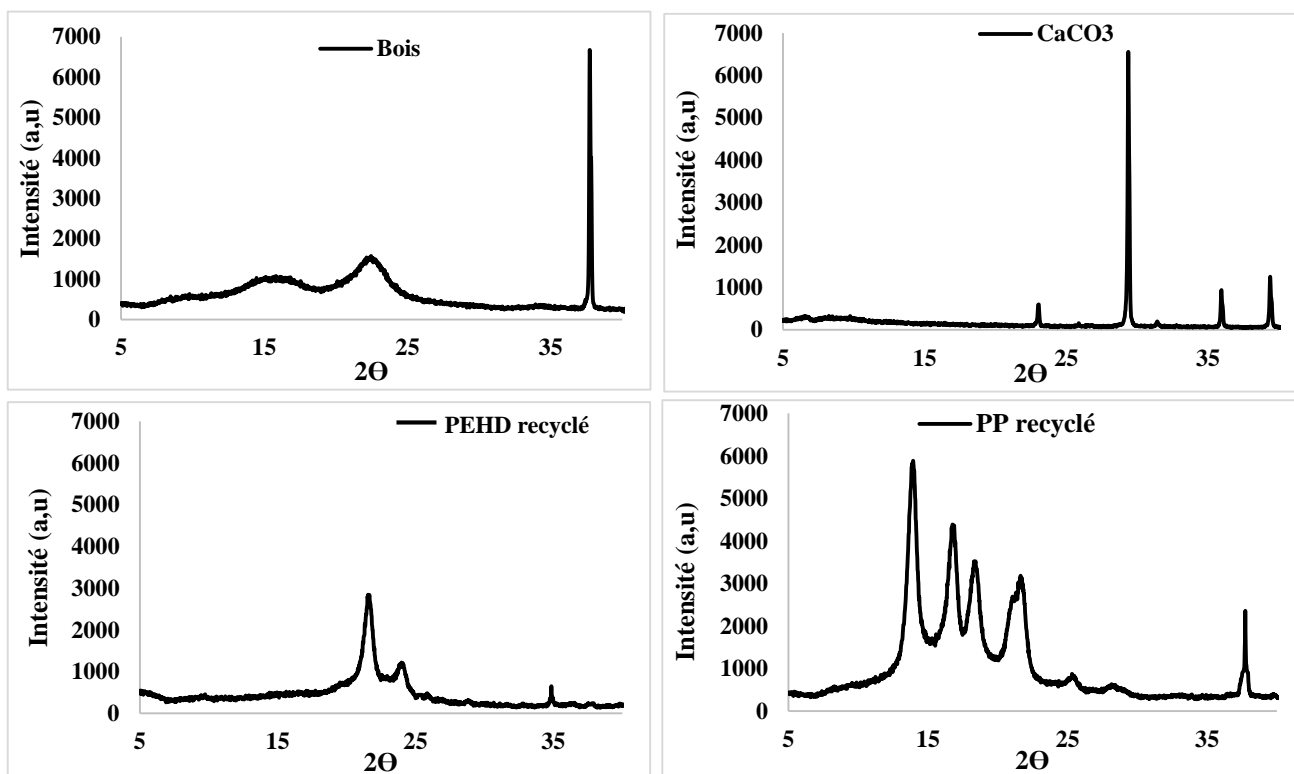


Fig.57. Diffractogrammes du bois, du CaCO₃, du PEHD et du PP.

III.2.3.3.5. Diffractogramme des CBP

Il ressort de la figure 58 que l'allure de tous les diagrammes de DRX des CBPr est similaire mais l'intensité des pics dépend de la formulation du CBPr. Les valeurs maximales de la réflexion 2θ [158,159] correspondent aux plans cristallographiques de la cellulose et du polymère recyclé.

Pour ce qui est des CBPr contenant du CaCO₃, la bande cristalline caractéristique du CaCO₃ a été observée à la réflexion $2\theta = 29,38^\circ$ avec une intensité faible qui reflète le pourcentage faible du CaCO₃ dans les CBP.

De plus la bande cristalline caractéristique du CaCO₃ a été observée à la réflexion $2\theta = 29,38^\circ$ d'une intensité faible pour les composites bois-PPr, cela est dû au faible pourcentage du carbonate de calcium. Tous les spectres DRX présentent les mêmes pics, ce qui signifie qu'il n'y a pas de liaison chimique entre les deux phases des composites dans un bon compromis avec les données de l'infrarouge.

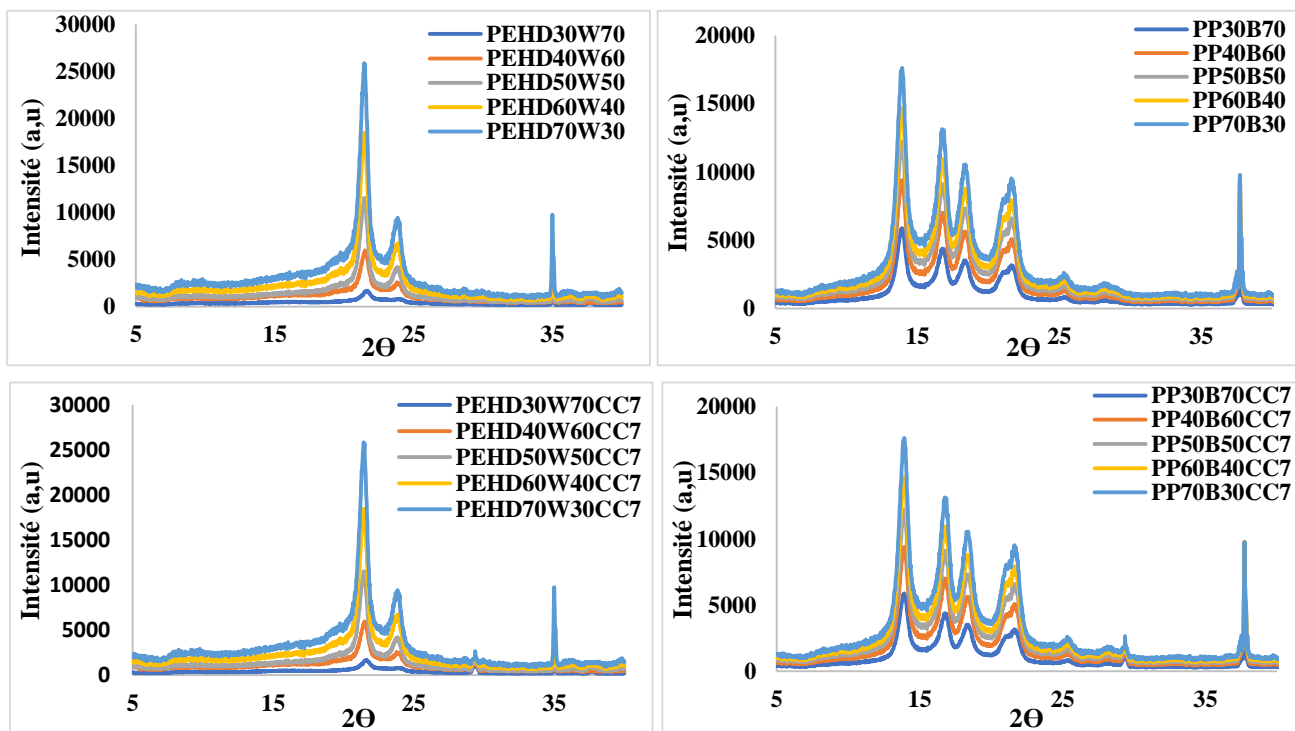


Fig.58. Diffractogrammes des différentes formulations de CBP.

III.2.3.4. Analyse par microscopie électronique à balayage

Les micrographies prises à la microscopie électronique à balayage des différentes formulations de CBP à base de PEHD_r sont données dans les figures 59 et 60.

Au faible grossissement, la morphologie des surfaces des CBPr perd son aspect lisse au profit d'une rugosité au fur et à mesure que la teneur en bois dans le CBPr augmente. Cette observation confirme les mesures de l'angle de contact dont la valeur diminue lorsque le CBPr s'enrichit en bois.

L'observation de la face interne du panneau montre, au fort grossissement, des zones d'apparence lisse, des agglomérats et des fibrilles étirées. Ces dernières apparaissent de différentes formes et dimensions, s'affinent et ne sont pratiquement plus visibles avec la diminution du contenu de la matrice thermoplastique dans le CBPr. Les fibrilles signaleraient les déformations que la matrice aurait subies sous l'effet conjugué de la compression et de la chaleur lors de l'élaboration du CBPr. De plus, l'aspect lisse et continu du panneau aux faibles taux de bois dans le CBPr disparaît au profit d'une

discontinuité du panneau conduisant à la formation d'une porosité. Cette dernière se développe lorsque le contenu du bois dans le CBPr croît, ce qui dénoterait de la faiblesse aussi bien de l'adhésion du renfort fibreux à la matrice et/ou de celle des fibres de bois entre-elle. Le développement de la porosité avec le taux croissant du bois dans le CBPr corrobore les explications avancées sur les résultats des tests d'absorption de l'eau des CBPr.

La morphologie de l'agglomérat CBP semble s'améliorer avec l'ajout de CaCO_3 . Cet aspect se révèle en comparant la fractographie de PEHD_r 50 B50 (figure 59) à celle PEHD_r 43 B50 CC7 (figure 61). En effet, la porosité apparente sur la fractographie de HDPE_r 50 B50 diminue nettement sur la fractographie de PEHD_r 43 B50 CC7, affirmant ainsi l'effet de l'ajout de CaCO_3 sur le colmatage des CBPr et sur le développement de cette morphologie.

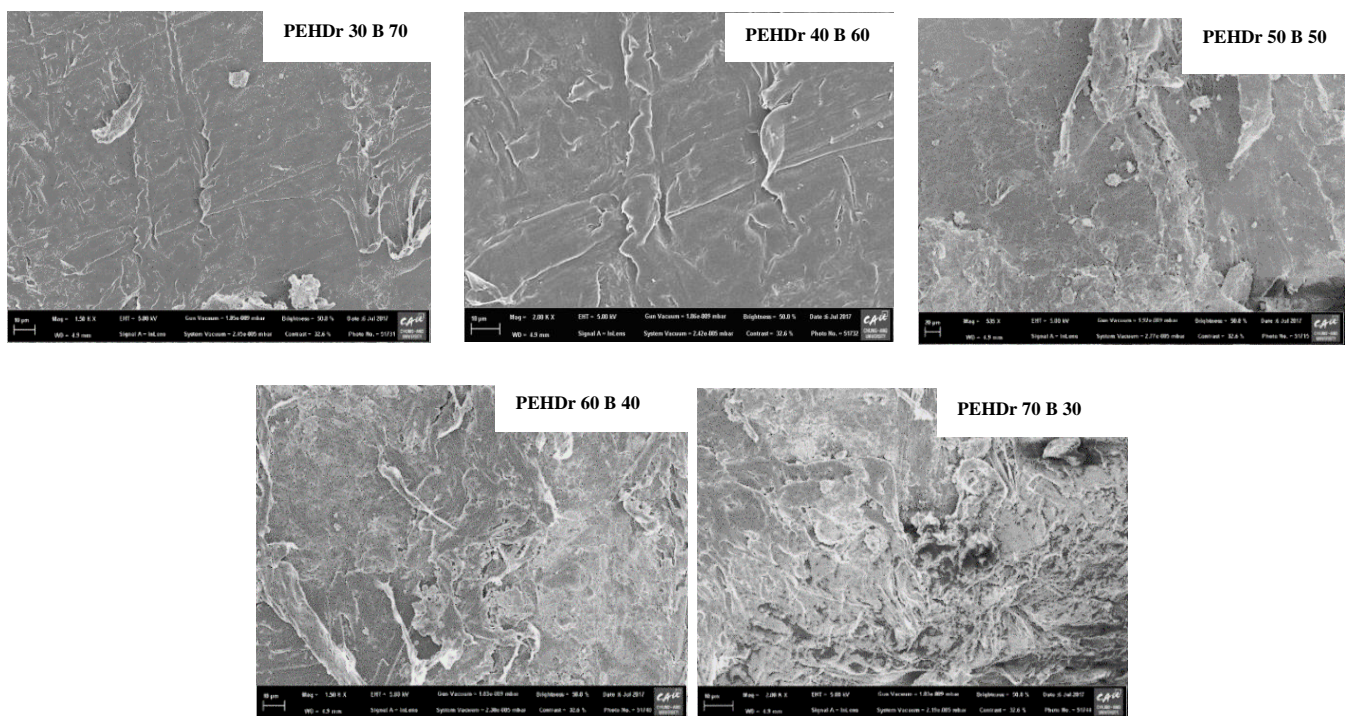


Fig.59. Micrographies MEB des compositions (bois-PEHD_r) agrandissement de 150 fois.

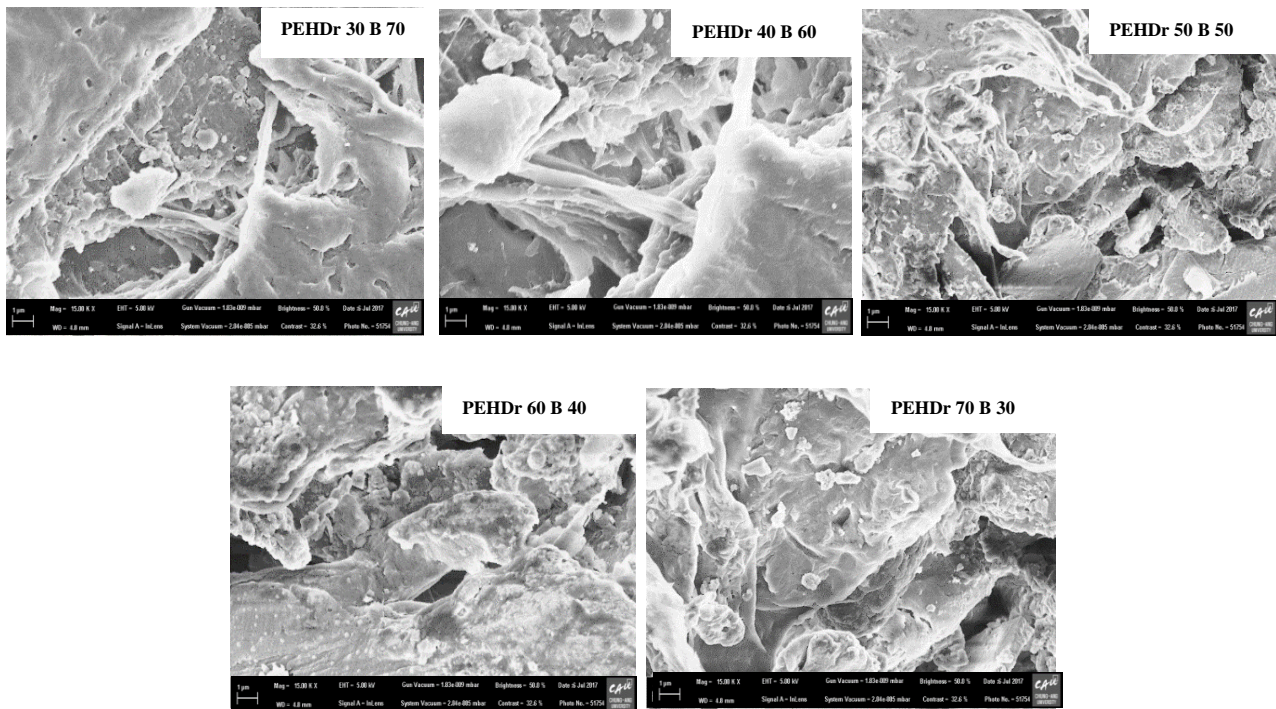


Fig.60. Micrographies MEB des compositions (bois-PEHDr) agrandissement de 1500 fois.

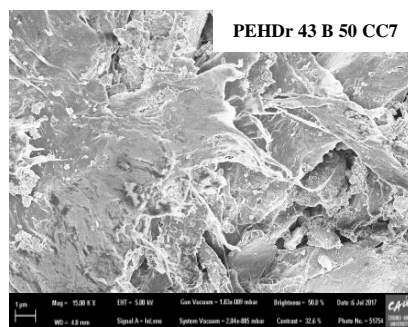


Fig.61. Micrographies MEB de la composition (bois-PEHDr) avec 7 % de $(CaCO_3)$, agrandissement de 1500 fois.

III.2.4. Récapitulatif sur résultats de la caractérisation des CBP

Au terme des caractérisations physiques, mécaniques et structurales des composites bois-polymère (CBP) fabriqués avec de la poudre de pin maritime combinée au polymère, vierge ou recyclé, avec et sans ajout de $CaCO_3$.

La mesure de la densité indique que, les composites aussi bien ceux fabriqués avec le polymère recyclé qu'avec le polymère vierge, augmente avec l'augmentation de la teneur en bois dans le CBP. De plus, la densité en présence du polymère recyclé est plus élevée que celle en présence du polymère vierge. En revanche, la densité du CBP à

base de polymère recyclé est plus faible que celle du même CBP avec ajout de 7 % en masse de l'agent de couplage CaCO_3 .

L'absorption et le gonflement d'eau, pendant 2 h, 24 h augmente avec l'augmentation de la teneur en bois dans les CBP et vice versa avec la teneur en polymère. Ces deux paramètres diminuent avec l'utilisation de polymère recyclé et avec l'ajout de 7 % en masse de CaCO_3 . La saturation en eau des différents CBP est atteinte au bout de 31 jours d'immersion, elle résulte du remplissage de la microposité avec l'eau qui s'infiltré ensuite pour atteindre les fibres de bois.

La résistance et le module à la traction et à la flexion trois points dépend de la teneur en bois dans la matrice polymère, en effet ses deux paramètres évoluent en sens inverse lorsque le CBP se concentre en bois. Par ailleurs, aussi bien pour la résistance que pour le module, leurs valeurs sont plus élevées pour les CBP à base de polymère recyclé en comparaison au polymère vierge, ces valeurs sont plus élevées lors de l'utilisation de CaCO_3 pendant l'élaboration des CBP à base de polymère recyclé. De plus la résistance et le module des CBP contenant le PP est plus faible que celle des CBP contenant PEHD.

L'analyse par infra-rouges ou par diffraction des rayons X des composites CBP a révélé que l'interaction entre les différents composants de CBP est de nature physique puisque les pics infrarouges de tous les CBP examinés restent inchangés, avec ou son l'ajout de CaCO_3 .

Les résultats de la mesure de l'angle de contact indiquent que la surface des CBPr contenant une teneur élevée en PP indique un comportement en hydrophobie élevé que celui du CBPr avec la même teneur en PEHD, cet angle décroît considérablement lorsque la teneur en bois est beaucoup plus grande que celle du polymère dans le CBPr, fait probablement attribuable à l'hydrophilie du bois. Par ailleurs, l'ajout de 7 % de CaCO_3 a provoqué une augmentation de la valeur de l'angle de contact pour les mêmes formulations des CBPr. Ces résultats mesurés sont comparables à ceux calculé par notre méthode développée, ce qui signifie que notre méthode développée est valide.

L'analyse par microscopie électronique à balayage met en évidence, au faible grossissement, que la morphologie des surfaces des CBPr perd son aspect lisse au fur et à mesure que la teneur en bois dans le CBPr augmente. Ceci conduit à la formation d'une porosité qui dénoterait de la faiblesse aussi bien de l'adhésion du renfort fibreux à la matrice et/ou de celle des fibres de bois entre elles. Le développement de la porosité avec le taux croissant du bois dans le CBPr corrobore les explications avancées sur l'absorption de l'eau par les CBPr. L'ajout de CaCO_3 semble améliorer la morphologie de l'agglomérat CBPr.

Conclusion et perspectives

Pin maritime

Conclusions et remarques émanant des caractérisations dendrométrique, physique, et mécanique

Composites Bois-polymère

Conclusions et remarques émanant de la stabilité dimensionnelle, des caractérisations physiques, mécanique, spectrale et texturale

Comme nous l'avons fait depuis le début de ce mémoire, nous avons présenté les travaux réalisés sur le pin maritime et ceux sur les CBP séparément, nous procéderons de même pour tirer les remarques et points essentiels qui ressortent de nos résultats expérimentaux.

Pin maritime

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans le cadre de la caractérisation du bois de pin maritime et sa valorisation en composite bois-polymère (CBP).

L'étude des indicateurs de contraintes de croissance (ICC) que nous avons réalisée sur quatre arbres sur pied de pin maritime de la Maamoura, nous a révélé que le bois considéré est assez nerveux avec une contrainte moyenne d'environ $72 \mu\text{m}$. Nous avons obtenu deux classes de profils moyens construits à partir de la distribution des valeurs maximales des ICC. La première classe dont les ICC sont supérieures à $72 \mu\text{m}$ se caractérise par un profil plus au moins aigu (arbres 1 et 3). La deuxième classe dont les ICC sont inférieures à $72 \mu\text{m}$ se caractérise par un profil quasi-symétrique (arbre 2) et un profil plus au moins plat (arbre 4). La distribution en fréquence suivant les classes des ICC se caractérise par une dissymétrie à droite plus ou moins marquée. La queue de distribution (traîne) se caractérise par un nombre limité de valeurs élevées des ICC caractérisant un bois présentant un état de contraintes de croissance différent (bois de tension).

Après avoir effectué les mesures dendrométriques et les premières transformations du bois de pin maritime, nous avons déterminé le rendement de sciage secondaire après délignage R_{sciage} . Ce rendement est d'environ 58 %.

L'étude de la cinétique de séchage du bois de pin maritime sous abri à l'air libre, a permis d'estimer le temps nécessaire pour réduire l'humidité des échantillons de bois de 54 % à environ 11 %. Cette variation d'état d'humidité est fortement perturbée par plusieurs paramètres (changements climatiques, variation de température du jour et de nuit, ...), conduisant à des phénomènes de retrait ou de gonflement. Par ailleurs, nous

avons enregistré des déformations (collapse, touille, gauchissement, fissurations) au sein des échantillons de bois testés durant le séchage.

Le séchage artificiel semi-automatique des échantillons de bois de pin maritime à l'aide du séchoir Cathild à des conditions constantes de température $T = 30\text{ °C}$ et d'humidité relative H_r de l'ordre de 12 % a nécessité moins de temps pour atteindre une humidité finale de l'ordre de 11 %. Dans ces conditions, les cinétiques de séchage des planches sont homogènes, et les planches sèchent presque de la même manière surtout dans le domaine hygroscopique. Par ailleurs, nous avons enregistré lors du séchage artificiel moins de déformations au sein des échantillons de bois par comparaison au séchage à l'air libre.

La caractérisation physique menée, a permis de montrer que le bois juvénile a des propriétés assez différentes du bois adulte. En effet, la variation de l'humidité entre le bois de cœur et la périphérie est importante pour le pin maritime. L'humidité est quasiment constante dans le bois juvénile tandis qu'elle augmente dans le bois adulte. La chute d'humidité à la périphérie est attribuée au séchage des surfaces. Par ailleurs, nous avons remarqué également une variation de l'infra-densité du bois de pin maritime du cœur à la périphérie.

La caractérisation mécanique du bois de pin maritime par détermination du module d'élasticité en compression axiale en fonction de la densité moyenne à 11 % d'humidité pour les quatre arbres en raison de 30 éprouvettes par arbre, a montré qu'au fur et à mesure que la densité augmente, le module d'élasticité augmente aussi.

La caractérisation physique et mécanique nous a permis de classer le bois de pin maritime étudié en bois moyennement dense, nerveux, anisotrope, mi-lourd, à retrait de séchage moyennement élevé, tendre, rigide et résistant pouvant être utilisé comme bois rond ou en sciage pour caisserie et menuiserie courante.

Composites Bois-polymère

Nous avons entrepris aussi une étude des propriétés de composites Bois-Plastique (CBP) utilisant le bois de pin maritime et un polymère. Les polymères utilisés sont : le polyéthylène haute densité (PEHD) et le polypropylène (PP).

Les expérimentations menées, nous ont permis de montrer que les composites fabriqués avec de la matière plastique recyclée sont plus denses que ceux fabriqués avec de la matière plastique vierge. En effet, une densité élevée implique une porosité réduite du composite, donc une compatibilité interfaciale plus forte et une absorption et un gonflement réduits. Par ailleurs, le gonflement et l'absorption d'eau sont importants suite à l'augmentation de la teneur en bois avec le polymère.

Les mesures de la résistance en traction des composites étudiés ont révélé une augmentation de cette résistance suite à l'augmentation de la teneur en polymère. Par contre, le module en traction diminue. L'addition de 7 % de carbonate de calcium (CaCO_3) a permis d'augmenter le module et la résistance en traction et en flexion pour les composites fabriqués avec les polymères PEHD et PP.

L'analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR/ATR) et par diffraction des rayons X (DRX) des composites étudiés a mis en évidence l'absence d'interactions chimiques entre les polymères recyclés (PEHDr, PPr) et la farine de bois de pin maritime.

Cette analyse nous a permis de montrer une diminution de la rugosité de l'état de surface des composites suite à l'augmentation de la teneur en polymère (PEHDr,PPr) et à l'addition de l'agent de couplage (CaCO_3). Cette rugosité est plus faible pour les composites fabriqués avec le PEHD comparée à celle des composites avec le PP.

L'étude par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) des échantillons de composites bois-polymère (CBP) a montré que la morphologie des échantillons bois-PEHDr est influencée par la teneur en polymère dans le composite.

Le présent travail peut être complété par d'autres expérimentations concernant la valorisation du bois de pin maritime par déroulage, la durabilité des composites bois-polymère (CBP) exposés à l'attaque chimique et aux insectes et l'étude comparative

avec d'autres composites bois-polymère pour rechercher le couple (bois, polymère) donnant les meilleures propriétés physiques et mécaniques.

Références

- [1] AEFCS, « Plan National de Reboisement au Maroc ». Organisation des nations unies pour l'alimentation et agriculture, FAO N° AT 2803, Rome (1970).
- [2] S. Abanto, « Développement d'un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium ». Thèse de Doctorat, Université Laval, Laval (2018).
- [3] M. A. Lahmar, « Caractérisation d'un composite bois-polymère pour utilisation en plaques de bardage par l'extérieur ». Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1 (2017).
- [4] A. Andrieu, M. Hedou, A. Mouren, P. Pham, « Les bio-composites thermodurcissables à base de lin dans l'automobile ». Rapport de veille technologique et d'intelligence économique, (2019).
- [5] C. Celhay, « Fractionnement de coproduits de pin maritime (*Pinus pinaster*) et de peuplier (*Populus tremula*) pour l'obtention d'extraits polyphénoliques à activité antioxydante : procédé d'extraction aqueuse en extracteur bi-vis et étude des conditions subcritiques ». Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique, Toulouse (2013).
- [6] E. Rigolot, P. Fernandes, « Ecologie du pin maritime en relation avec le feu et gestion des peuplements pour leur protection contre l'incendie ». Forêt méditerranéenne, pp. 97–110, (2005).
- [7] R. Abad Viñas, G. Caudullo, S. Oliveira, D. de Rigo, « *Pinus pinaster* in Europe: distribution, habitat, usage and threats ». European Atlas of Forest Tree Species. Publ. Off. EU, Luxembourg, (2016).
- [8] R. Alía, S. Martín, « *Pinus pinaster* ». Fiche technique pour la conservation génétique (2011).
- [9] D. A. Assmaa and P. G. Najib, « Production, croissance et modèles de conduite sylvicoles des principales essences (le pin maritime et le pin d'Alep) de reboisement au Maroc ». Journal of Forestry Faculty, Vol. 11, No. 1, pp. 68–84 (2011).
- [10] J. Viguié, « Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique ». Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, Lorraine (2015).
- [11] P. Navi, F. Heger, « Comportement thermo-hydrromécanique du bois ». Presse polytechniques et universitaires romandes, (2005).

- [12] S. Mounira, «Apprentissage de la production écrite : Vers une adaptation de la progression thématique ». Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider –Biskra, (2018).
- [13] A. Othmani, « Identification automatisée des espèces d'arbres dans des scans laser 3D réalisés en forêt ». Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Bourgogne (2014).
- [14] J. Massenet, « Forme et âge d'un arbre, épaisseur de l'écorce ». Lycée forestier, château de Mesnière, (2010).
- [15] A. Jamaaoui, « Durabilité et comportement hygroscopique du Douglas en relation avec son patrimoine génétique ». Thèse de Doctorat, Université de Limoges, (2017).
- [16] R. Keller, « Influence de quelques facteurs de la production sur la constitution du bois des arbres forestiers ». Acta Bot. Gall., vol. 140, no. 4, pp. 371–379, (1993).
- [17] M. Sarmoum, F. Guibal, and F. Abdoun, « Effet des facteurs stationnels sur la croissance radiale et la réponse du pin d'Alep au climat dans le massif de l'Ouarsenis, Algérie ». Bois et Forêts des Tropiques, Montpellier : CIRAD, pp.17-27 (2016).
- [18] K. Rabhi, M. Tafer, and M. Messaoudene, « Évolution des proportions d'aubier et de duramen du cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica* Manetti, en Algérie ». CIRAD, Vol. 322 (2014).
- [19] B. Jourez, « Anatomie et identification des bois ». Université de Liège, Gembloux (2010).
- [20] P. Moraes, « Influence de la température sur les assemblages bois ». Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Faculté des Sciences et Techniques, Nancy 1 (2003).
- [21] B. Thibaut, « La genèse du bois ». Université Montpellier 2, France (2012).
- [22] A. Naim, « Optimisation de la valorisation énergétique des gaz de pyrolyse des pneus hors d'usage ». Thèse de Doctorat, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, (2017).
- [23] Structure et fonctionnement du tronc dans les échanges de substance de l'arbre, p. 15.
- [24] P. Perré, « Voyage au cœur du bois ». ESPCI, Agro Paris Tech, Nancy (2010).
- [25] B. Odounga, « Etude de la fissuration des bois tropicaux par mesures des champs ». Génie civil. Université Clermont Auvergne, (2018).

- [26] F. Ghomari, A. Bendi-ouis, « Science des matériaux de construction travaux pratiques ». Université Aboubekr Belkaid, (2007).
- [27] B. Thibaut, « Le compartiment ligneux de l'arbre source de matériaux biosourcés ». La Grande Motte, 3^{ème} séminaire du GDR symbiose 29 Mai – 1er juin, (2017).
- [28] M. Reille, M. Lavoie, « Image analyses des végétaux vasculaires à l'usage des étudiants en botaniques ». Université d'Aix-Marseille III, (2002).
- [29] H. Cochard, A. Granier, « Fonctionnement hydraulique des arbres forestiers ». Rev. For. Fr. LI - 2-(1999).
- [30] A. Granier, « Etude, Etude bibliographique. - Transfert de sève brute dans le tronc des arbres aspects méthodologiques et physiologiques ». Ann. Sci. foresi, 1977, 34 (1), 17-45, (1977).
- [31] J. Natterer, « Construction en bois: matériau, technologie et dimensionnement ». Presses polytechniques, Vol.13, (2004).
- [32] M. Trouy, « Anatomie du bois: Formation, fonctions et identification (Synthèses) ». Éditions Quae (2015).
- [33] D. Guitard, « Mécanique du matériau bois et composites ». Cépaduès-Editions - DL (1987).
- [34] M. Galhac-noel, « Elaboration d'un matériau composite innovant à base de bois et de bio-polymère d'acide lactique ». Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1 (2007).
- [35] M. Trouy-Triboulot, P. Triboulot, « Matériau bois : Structure et caractéristiques. Techniques de l'ingénieur ». Techniques de l'ingénieur. Construction, (C925) :C925. 1–C925. 26, (2001).
- [36] B. Cathala, « GDR Assemblages des Molécules Végétales: Parois végétales ». 2015.
- [37] K. Persson, « Mechanical behaviour and analysis of wood fibres ». First International Conference of the European Society for Wood Mechanics, 419-428 (2001).
- [38] Sophie thiebaud, « Valorisation chimiques des composés lignocellulosiques : obtention de nouveaux matériaux ». Thèse de Doctorat, École nationale supérieure d'ingénieurs en arts chimiques et technologiques, Toulouse (1995).

- [39] O. Pras, « Utilisation de cellulose pour l'élaboration de matériaux photoluminescents ou conducteurs ». Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, (2011).
- [40] L. Boiron, « Etude de l'impact de l'extraction des hémicelluloses du bois sur les procédés d'obtention de cellulose et d'éthanol dans le cadre d'une bioraffinerie lignocellulosique ». Thèse de Doctorat, Génie des procédés. Université de Grenoble, (2012).
- [41] J.-L. Wertz, « Les hémicelluloses : Note de synthèse ». Document ValBiom – Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, (2011).
- [42] A. Jarriault, « Extraction des hémicelluloses de pâtes papetières pour la production de pâte à dissoudre ». Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, (2015).
- [43] ADEME, « Etude de valorisation des cendres de chaufferies bois ». Bureau d'Etudes Trivalor, (2001).
- [44] P. Perré, É. Badel, « De l'eau dans l'arbre à l'eau dans le matériau bois : une introduction ». Rev. For. Fr. LVIII - 4-2006, (2006).
- [45] M. Sylvie, B. Jacques, P. François, « Le matériau bois et ses dérivés : définition et propriétés, dégradation et protection ». Licence professionnelle, Génie civil et bâtiment en zone intertropicale, CIRAD, 68 p. Montpellier (2007).
- [46] P. Sallenave, « Propriétés physiques et mécaniques de quelque bois tropicaux ». Imprimerie Jouve, Centre technique forestier tropical, Seine (1964).
- [47] B. Clair, « Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire : essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse ». Thèse de Doctorat, Université -Montpellier, (2001).
- [48] FNB, « Fiche Comprendre le retrait du bois ». (2018).
- [49] M. J. Kisito, « Regroupement mécanique par méthode vibratoire des bois du bassin du Congo ». Thèse de doctorat, en cotutelle entre l'Université de Yaounde 1 et l'Université Bordeaux 1, (2008).
- [50] H. Polge, « Le bois de pin d'Alep ». T. XIII, n°3, 1992, pp. 234-237, (1992).
- [51] C. Grazide, « Une modélisation de la résistance en flexion du pin maritime utilisé en construction ». Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, (2014).

- [52] P. François, « Plasticité du bois en compression multiaxiale : application à l'absorption d'énergie mécanique ». Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 140 pp, Bordeaux (1992).
- [53] J. S. Poulsen, P. M. Moran, C. F. Shih, and E. Byskov, « Kink band initiation and band broadening in clear wood under compressive loading ». *Mechanics of Materials*, Vol. 25, issue 1, pp 67-77, (1997).
- [54] S. Pommier, « Mécanique des matériaux ». Master, France (2017).
- [55] L. Benabou, Z. Sun, « Approche continue de la rupture du bois en grands déplacements ». Conférence: 21^{ème} Congrès Français de Mécanique, (2013).
- [56] S. Guillou, « Etude du comportement d'un alliage chromino-formeur comme matériau d'inter-connecteur pour l'électrolyse à Haute Température ». Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, (2011).
- [57] Bodig, Jozsef Jayne, A. Benjamin, « Mechanics of wood and wood composites ». New York (N.Y.): Van Nostrand Reinhold, XXI, 712 p, (1982).
- [58] G. Pluinage, « La rupture du bois et ses composites ». Editions Cépaduès, (1992).
- [59] L. Brancheriau, JD. Lanvin, « Recherche de moyens de contrôle non destructif permettant la découverte de criques dans les structures bois ». CIRAD et FCBA, (2008).
- [60] M. Perrin, « Étude et caractérisation par émission acoustique et mesures électrochimiques de la fragilisation par l'hydrogène des câbles de précontrainte. Application aux ouvrages d'art ». Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2009).
- [61] A. Sibil, « Comportement thermomécanique et endommagement de nouveaux réfractaires verriers à très haute teneur en zircone : investigation des mécanismes de fissuration par EBSD et émission acoustique ». Thèse de Doctorat, INSA, Lyon (2011).
- [62] I. Brémaud, « Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique. Etude expérimentale des propriétés vibratoires en direction axiale de types de bois contrastés en majorité tropicaux. Relations à des déterminants de microstructure et de composition chimique secondaire ». Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, (2006).

- [63] V. Bucur, « Détermination du module d'Young du bois par une méthode dynamique sur carottes de sondage ». *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences*, 38 (2), pp.283-298. (1981).
- [64] J. Ilic, « Dynamic MOE of 55 species using small wood beams ». *Holz Roh Werkst* 61, 167–172, (2003).
- [65] F. Oliveira, J. Campos, A.Sales, « Ultrasonic Measurements In Brazilian Hardwood ». *Materials Research*, Vol. 5, No. 1, 51-55, (2002).
- [66] J. Quintanar, H. de Icaza, N. Rivera et P.de la Paz, « Algunas características anatómicas y acústicas de tres especies de angiospermas de Huayacocotla, ver ». *Madera y Bosques* 4(1), pp.15-25, (1998).
- [67] J.Mark, « Physical Properties of Polymer Handbook ». Berlin: Springer. ISBN: 978-0-387-31235-4, (2007).
- [68] M.H. Cohen, « Molecular Transport in Liquids and Glasses ». *J. Chem. Phys.* 31, 1164, (1959).
- [69] H. Fujita, « Diffusion in Polymer-Diluent Systems». *Fortschr. Hochpolym.-Forsch.*, Bd. 3, S. 147, (1961).
- [70] Z.H. Ping, Q.T. Nguyen, S.M. Chen, J.Q. Zhou, Y.D. Ding, « States of water in different hydrophilic polymers-DSC and FTIR studies». *Polymer*, Vol. 42, Issue 20, pp. 8461-8467, (2001).
- [71] C.R. Dias, Norberta de M. Pinho, « Water Structure and Selective Permeation of Cellulose-Based Membranes ». *Journal of Molecular Liquids*, Vol.80, Issues 2–3, pp. 117-132, (1999).
- [72] A-M. Olsson, L. Salmén, « the association of water to cellulose and hemicellulose in paper examined by FTIR spectroscopy ». *Carbohydr Res*, Vol. 339(4), pp.813-8, (2004).
- [73] S. Cotugno, G. Mensitieri, P. Musto, L. Sanguigno, « Molecular Interactions in and Transport Properties of Densely Cross-Linked Networks: A Time-Resolved FTIR Spectroscopy Investigation of the Epoxy/H₂O System ». *Macromolecules*, Vol.38, 3,pp. 801–811, (2005).

- [74] P. Musto, G. Ragosta, G. Mensitieri, M. Lavorgna, « On the Molecular Mechanism of H₂O Diffusion into Polyimides: A Vibrational Spectroscopy Investigation ». *Macromolecules*, Vol.40, 26, pp.9614–9627, (2007).
- [75] G. Mensitieri, M. Lavorgna, P. Musto, G. Ragosta, « Water transport in densely crosslinked networks: A comparison between epoxy systems having different interactive characters ». *Polymer*, Vol.47, Issue 25, pp. 8326-8336, (2006).
- [76] G. Mensitieri, M. Lavorgna, D. Larobina, G. Scherillo, G. Ragosta, P. Musto, « Molecular Mechanism of H₂O Diffusion into Polyimides: A Model Based on Dual Mobility with Instantaneous Local Nonlinear Equilibrium, *Macromolecules* ». *Macromolecules* 2008, Vol. 41, 13, pp. 4850–4855, (2008).
- [77] L-S. Wan, X-J. Huang, Z-K. Xu, « Diffusion and Structure of Water in Polymers Containing N-Vinyl-2-pyrrolidone ». *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 111(5), pp.922-928, (2007).
- [78] H. Kusanagi and S. Yukawa, « Fourier transform infra-red spectroscopic studies of water molecules sorbed in solid polymers ». *Polymer*, Vol. 35, Issue 26, pp. 5637-5640, (1994).
- [79] H. Obeid, A. Clément, S. Fréour, F. Jacquemin, V. Sansalone, P. Casari, « Caractérisation du comportement hygromécanique de composites à matrice polyamide renforcée par des fibres de verre ». *Revue des composites et des matériaux avancés*, Vol 27 (3-4) pp.231-248, (2017).
- [80] S.A Nielsen, S.I. Andersen, H. Toftegaard, « An Ultrasonic Circular Aperture Technique to Measure Elastic Constants of Fiber Reinforced Composite ». 24. *International Conference on Acoustical Imaging - Santa Barbara, CA (US)*, pp. 215-222, (1998).
- [81] L. Monson, M. Braunwarth, C. W. Extrand, « Moisture absorption by various Polyamides and their associated dimensional changes ». *J. Applied Polymer Science*, Vol.107, Issue1, pp. 355-363, (2008).
- [82] B. Guerira, N. Derias, S. Derfouf, M. Hadid, «Effet de l'humidite sur les proprietes mecaniques du polymere thermoplastique takmid PA6». *Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution ICEMAEP2016*, October 30-31, Constantine, Algeria, (2016).

- [83] I. Yakimets, D. Lai, and M. Guigon, « Model to predict the viscoelastic response of a semi-crystalline polymer under complex cyclic mechanical loading and unloading conditions ». *Mech Time-Depend Mater*, Vol. 11, pp.47–60, (2007).
- [84] R. Selzer, K. Friedrich, « Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture ». *Composites Part A: Applied, Science and Manufacturing*, Vol. 28, Issue 6, pp. 595-604, (1997).
- [85] A. Hassan, N. A. Rahman, R. Yahya, « Moisture absorption effect on thermal, dynamic mechanical and mechanical properties of injection-molded short glass-fiber/polyamide 6, 6 composites ». *Fibers and Polymers*, Vol. 13, pp. 899-906, (2012).
- [86] I. F. Kaimin, A. P. Apinis, A. Y. Galvanovskii, « The effect of the moisture content on the transition temperatures of polycaproamide ». *Polymer Science U.S.S.R.*, Volume 17, Issue1, pp. 46-51, (1975).
- [87] A. V. Nguyen, « Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques ». Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, (2015).
- [88] N. Dujardin, « Un Matériau Biosource De Choix : Les Fibres Naturelles. Caractérisations Et Applications ». 25^{èmes} Journées Scientifiques de l'Environnement – L'économie verte en question, 18 - 20 février, (2014).
- [89] V. Placet, « Influence de traitements hygrothermiques sur les propriétés mécaniques de composites à fibres végétales Effect of hygrothermal treatment on the mechanical properties of natural fibres composites ». *JNC 16*. p 10, Toulouse (2009).
- [90] J. Luc Wertz, « Les biocomposites et composites polymère-chanvre en particulier ». Valbiom, (2014).
- [91] E. Devaux and C. Cazé, « Composites of UHMW polyethylene fibres in a LD polyethylene matrix. I. Processing conditions ». *Composites Science and Technology*, Volume 59, Issue 3, pp. 459-466, (1999).
- [92] T.Q. Li, M. P. Wolcott, « Rheology of HOPE-wood composites. 1. Steady state shear and extensional Flow ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Issue 3, pp. 303-311, (2003).

- [93] J. Simonsen, C. M. Freitag, A. Silva et J. J. Moreil, « Wood/plastic ratio Effect on the performance of borate biocides against a brown rot fungus. *Holzforschung* ». *Holzforschung*, Vol. 58, pp. 205–208, (2004).
- [94] J. Soucy, « Potentiel d'utilisation des fibres de papier dans la conception de composites bois polymères par une technologie d'extrusion ». Thèse Doctorat, Université du Québec, (2007).
- [95] F. Michaud, « Rhéologie de panneaux composites sous chargement thermomécanique : Aptitude au post-formage Remerciements ». Thèse de Doctorat, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec 2003.
- [96] H. Sleiman, «Aptitude à la mise en œuvre de thermoplastiques recyclés. Analyse thermorhéologique de mélanges PP/PE ». Thèse de Doctorat, Université Bretagne Loire, (2018).
- [97] R.Mani, J. Tang, « Bhattacharya M. Synthesis and characterization of starch graftpolycaprolactone as compatibilizer for starch/polycaprolactone blends ». *Macromolecular Rapid Communications*, Vol. 19, issue 6, pp.283-286, (1998).
- [98] L. Rigal et V. Marechal, « Mise au point de nouvelles colles d'origine végétale en particulier pour la production de composites à base de bois ». *Engineering*, Vol.7 No.12, (2015).
- [99] K. Li, X. Geng, « Formaldehyde-Free Wood Adhesives from Decayed Wood ». *Micromolecular rapid communications*, Vol. 26, issue7, pp. 529-532, (2005).
- [100] J.Z. Lu, Q. Wu, H.S. McNabb, « Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: A review of coupling agents and treatments ». *Wood and fibre science*, Vol. 32(1), pp.88-104, (2000).
- [101] I. Slama, « Caractéristiques physico-mécaniques des composites bois-plastiques provenant de la valorisation des résidus des panneaux MDF-étude des possibilités de recyclage ». Thèse de Doctorat, Université du Québec, (2008).
- [102] C. Srivabut, T. Ratanawilai, and S. Hiziroglu, « Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber ». *Construction and Building Materials*, Vol. 162, pp.450-458, (2018).

- [103] A.K. Bledzki, J. Gassan, and S. Theis, « Wood-filled thermoplastic composites ». *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 34, pp. 563–568, (1998).
- [104] T.J. Pratt, W.E. Johns, R.M. Rammon, W.L. Plagemann, « A novel concept on the structure of cured urea-formaldehyde resin ». *The Journal of Adhesion*, Vol. 17, Issue 4, pp. 275-295, (1985).
- [105] O. Clemons C, « Wood- plastic composites in the United States, the interfacing of two industries ». *Forest products journal*. Vol. 52, no. 6, pp. 10-18. (2002).
- [106] S. Migneault, A. Koubaa, F. Erchiqui, A. Chaala, K. Englund, C. Krause, M. Wolcott, « Effect of Fiber Length on Processing and Properties of Extruded WoodFiber/ HDPE Composites ». *J. Applied polymer science*, Volume 110, Issue 2, pp. 1085-1092, (2008).
- [107] Gamstedt, Kristofer & Nygård, Pia & Lindström, Mikael. « Transfer of knowledge from papermaking to manufacture of composite materials ». *Proceedings of the 3rd Wood Fiber Polymer Composites International Symposium*, (2007).
- [108] P. Michael, Wolcott, Karl Englund, « A Technology review of wood-plastic composites ». *33rd international particleboard/ Composite materials symposium*, (2000).
- [109] M. Takatani, H. Ito, S. Ohsugi, T. Kitayama, M. Saegusa, S. Kawai, T. Okamoto, « Effect of Lignocellulosic Materials on the Properties of Thermoplastic Polymer/Wood Composites ». (2000).
- [110] K. Oksman, H. Lindberg, « Influence of thermoplastic elastomers on adhesion in polyethylene-wood flour composites ». *J. Applied polymer science*, Vol.68, issue 11, pp. 1845-1855, (1998).
- [111] A. Espert, F. Vilaplana, S. Karlsson, « Comparison of water absorption in natural cellulosic fibers from wood and one- year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, Issue 11, pp. 1267-1276, (2004).
- [112] J. Balatinez, Park B-D, « The Effects of Temperature and Moisture Exposure on the Properties of Wood-Fiber Thermoplastic Composites ». *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 10(5), pp. 476-487. (1997).

- [113] Hee-Soo Kim, Sumin Kim, Hyun-Joong Kim, Han-Seung Yang, « Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content ». *Thermochimica Acta*, Vol. 450, issue 1-2, pp.181-188, (2006).
- [114] S.M. Luz, J. Del Tio, G.J.M. Rocha, A.R. Goncalves, A.P. Del'Arco Jr, « Cellulose and cellulignin from sugarcane bagasse reinforced polypropylene composites : Effect of acetylation on mechanical and thermal properties ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, Issue 9, pp. 1362-1369, (2008).
- [115] J.R. Araujo, W.R. Waldman, M.A. De Paoli, « Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect ». *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 93, issue 10, pp.1770-1775, (2008).
- [116] A. Daya, « Études des contraintes de croissance des arbres sur pied d'eucalyptus grandis et du chêne vert : caractérisation et valorisation sous forme de bois collé ». Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine - Metz, (2006).
- [117] Robert. R. Archer, « Growth stresses and strains in trees ». Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Vol.3, (1987).
- [118] E. A. Salah, « contribution à la caractérisation physique et mécanique et à la valorisation par le séchage du bois de la forêt Marocaine. Cas des eucalyptus et de la loupe de thuya ». Thèse de Doctorat, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat (2013).
- [119] L. Brancheriau, « Expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique ». Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, (2002).
- [120] Afnor, « French standard nf b 51013 ». Approved in february 1942, No74789, (1974).
- [121] N. Ayilimis, S. Jarusombuti, « Flat-pressed wood plastic composite as an alternative to conventional wood-based panels ». *Journal of Composite Materials*, Vol. 45(1), pp.103-112, (2011).
- [122] K.B. Adhikary, S. Pang, M.P, « Long-term moisture absorption and thickness swelling behavior of recycled thermoplastics reinforced with *Pinus radiata* sawdust ». *Chemical Engineering Journal*, issue 142, pp. 190–198, (2008).

- [123] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM D618- 99: In: 2002 Annual book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA: ASTM, (2002).
- [124] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM D570- 98: In: 2002 Annual book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA: ASTM, (2002).
- [125] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM D790-00: In: 2002 Annual book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA: ASTM, (2002).
- [126] Anamaria Sdrobiș, Raluca Nicoleta Darie, Marian Totolin, Georgeta Cazacu, Cornelia Vasile, « Low density polyethylene composites containing cellulose pulp fibers ». Composites Part B: Engineering, Vol.43, issue 4, pp. 1873-1880, (2012).
- [127] Peng Wang, Chenghao Liang, Bo Wu, Naibao Huang, Jielan Li, « Protection of copper corrosion by modification of dodecanethiol self-assembled monolayers prepared in aqueous micellar solution ». Electrochimica Acta, Vol.55, Issue 3, pp. 878-883, (2010).
- [128] Jean-françois Collin – Benoît Jourez – Jacques Hébert, « La problématique chablis, s'y préparer et gérer la crise! (1^{ère} partie) ». Forêt Wallonne asbl, (2006).
- [129] SASSUS F, « Déformations de maturation et propriétés du bois de tension chez le hêtre et le peuplier : mesures et modèles ». Thèse de doctorat, à l'école nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Montpellier (1998).
- [130] T. Salem, « Séchage intermittent du bois d'œuvre : étude expérimentale et numérique ». Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, (2016).
- [131] Akmel Djedjro Clément, « Séchage solaire des fèves de cacao : étude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage ». Thèse de Doctorat, Université d' Abobo-Adjamé, (2010).
- [132] T.K.Sherwood, « The air drying of solids ». National Academy of Sciences, Trans. A.I.Ch.E. 32:150. (1936).
- [133] T. H. Nguyen, « Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux ». Thèse de Doctorat, Génie des procédés. Université de Bretagne Sud, (2015).
- [134] J. Thiel, KEdi, A. Ahoba, D. Louppe, « Caractéristiques physiques des bois de 34 espèces ligneuses de forêt sèche ». Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, IDEFOR, (1993).

- [135] J. Campredon, « Etude des propriétés physiques et mécaniques de quelques bois exotiques ». Revues, ANN. FOREST. - T. V. - FASC. 2.
- [136] Norme Française NF B51-002, « Bois - Caractéristiques Physiques et Mécaniques des Bois ». Association française de Normalisation, Paris, pp. 17.
- [137] H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, M.O.W. Richardson, « Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites, composites sciences and technology ». Composites Science and Technology, Vol. 67, Issues 7–8, pp.1674-1683, 2007.
- [138] K. B. Adhikary, « Development of Wood Flour- Recycled Polymer Composite Panels As Building Materials ». Thèse de Doctorat, Chemical and Process Engineering, University of Canterbury (2008).
- [139] F. Mijiyawa, « Formulation, caractérisation, modélisation et prévision du comportement thermomécanique des pièces plastiques et composites de fibres de bois : application aux engrenages ». Thèse de doctorat, Université du Québec à trois-rivières, Chicoutimi (2018).
- [140] L. Amaury, « Elaboration de matériaux composites à base de filaments de cellulose et de polyéthylène ». Thèse de Doctorat, Université de Limoges, (2017).
- [141] S. E. Salih, A. F. Hamood, and A. H. Abd Alsalam, « Comparison of the characteristics of LDPE: PP and HDPE: PP polymer blends ». Modern Applied Science; Vol. 7, No. 3, (2013).
- [142] M. Fouzi, « Effet du taux de l'agent de traitement de surface et de compatibilisant sur les propriétés des composites à matrice thermoplastique /carbonate de calcium ». Magister, Université Setif-1, (2015).
- [143] Browning, B.L, « Methods of wood chemistry. Vol. I. Wiley & Sons, Interscience Publishers, New York ». Journal of Polymer Science Part A-2: Polymer Physics, Vol. 6, Issue 11, pp. 1943-1944, (1968).
- [144] S. Benyoucef, Dj. Harrache, «Caractérisation de la microstructure de sciure de bois de pin sylvestre"Pinus sylvestris ». J. Mater. Environ. Sci., Vol.6 (3), pp.765-772, (2015).

- [145] A. El Abed, « Réactivité thermique et cinétique de dégradation du bois d'arganier : Application à l'élaboration du charbon actif par activation chimique à l'acide phosphorique ». Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences, Rabat (2007).
- [146] H. Pereira, « Chemical changes of heat treated pine and eucalypt, Wood monitored by FTIR ». *Maderas. Ciencia y tecnología*, Vol. 15(2), pp. 245-258, (2013).
- [147] A. K. Rana, R. K. Basak, B. C. Mitra, Mark Lawther, A. N. Banerjee, « Studies of acetylation of jute using simplified procedure and its characterization ». *J. Applied polymer science*, Vol. 64, Issue8, pp.1517-1523, (1997).
- [148] A. Alemdar, M. Sain, « Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues – Wheat straw and soy hulls ». *Bioresource Technology*, Vol. 99, issue 6, pp. 1664-1671, (2008).
- [149] M. Haidar, « Optimisation et durabilité des micro-bétons à base d'époxyde ». Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, (2011).
- [150] A. D. Souza Gomes, « Polymerization ». DOI: 10.5772/2750, ISBN: 978-953-51-0745-3, eBook (PDF) ISBN: 978-953-51-6233-9, (2012).
- [151] R. Chércoles Asensio, M. San Andrés Moya, J. M. De La Roja, and M. Gómez, « Analytical characterization of polymers used in conservation and restoration by ATR-FTIR spectroscopy ». *Anal Bioanal Chem.*, Vol. 395(7), pp. 2081-96, (2009).
- [152] R.R.N. Sailaja, « Mechanical and thermal properties of bleached kraft pulp–LDPE composites: Effect of epoxy functionalized compatibilizer ». *Composites Science and Technology*, Vol. 66, issue 13, pp. 2039-2048, (2006).
- [153] K. Anandakumaran, S. K. Roy, and R. S. J. Manley, « Drawing-Induced Changes in the Properties of Polyethylene Fibers Prepared by Gelation / Crystallization ». *Macromolecules*, Vol. 21, issue 6, pp.1746–1751, (1988).
- [154] M. Sarker, M. M. Rashid, and M. Molla, « Waste polypropylene plastic conversion into liquid hydrocarbon fuel for producing electricity and energies ». *Environ Technol*, Vol. 33(22-24), pp.2709-21, (2012).
- [155] B. Righetti, R. Mello, D. Benedetto, D. Hirayama, and O. De Andrade, « Manufacturing and Characterization of Jute / PP Thermoplastic Commingled Composite 2. Experimental Procedures ». *Materials Research*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0104>, (2017).

- [156] NM. Stark, LM. Matuana, « Characterization of weathered wood–plastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS ». *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 92, pp. 1883-1890, (2007).
- [157] J.A. Baldock, R.J. Smernik, « Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood ». *Organic Geochemistry*, Vol.33, issue 9, pp. 1093-1109, (2002).
- [158] M. Sunilkumar, T. Francis, E. Thomas, and A. Sujith, « Low density polyethylene – chitosan composites: A study based on biodegradation ». *Chemical Engineering Journal*, Vol. 204-206, pp.114–124, (2012).
- [159] C. A. Echeverria, F. Pahlevani, and V. Sahajwalla, « Valorisation of discarded nonwoven polypropylene as potential matrix-phase for thermoplastic-lignocellulose hybrid material engineered for building applications ». *Journal of Cleaner Production*, Vol. 258, 120730. (2020).
- [160] A. R. Sena, M. A. M. Araujo, F. V. D. Souza, L. H. C. Mattoso, and J. M. Marconcini, « Characterization and comparative evaluation of thermal, structural, chemical, mechanical and morphological properties of six pineapple leaf fiber varieties for use in composites ». *Industrial Crops and Products*, Vol.43, pp.529–537, (2013).
- [161] M. Poletto, A. J. Zattera, M. M. C. Forte, and R. M. C. Santana, « Thermal decomposition of wood : Influence of wood components and cellulose crystallite size ». *Bioresource Technology*, Vol.109, pp. 148-153, (2012).
- [162] O. Article, « Mechanical interaction between cellulose microfibril and matrix substance in wood cell wall determined by X-ray diffraction ». *Journal of Wood Science*, Vol. 51, pp. 334–338, (2005).
- [163] J. Setz, J. Geis-Gerstorfer, and W. Lin, « The effect of inorganic fillers on the properties of light-curing composites ». *Dtsch Zahnarztl Z*, 46(10):657-60. PMID: 1817855. German (1991).
- [164] A. K. Gupta, S. K. Rana, and B. L. Deopura, « Crystallization behavior of high density polyethylene/linear low-density polyethylene blend ». *J. Applied polymer science*, Vol. 44, issue 4, pp. 719-726, (1992).
- [165] Mircea Chipara, John Hamilton, Alin Cristian Chipara, Tom George, Dorina Magdalena Chipara, Elamin E. Ibrahim, Karen Lozano, David J. Sellmyer, « Fourier

transform infrared spectroscopy and wide-angle X-ray scattering: Investigations on polypropylene-vapor-grown carbon nanofiber composites ». *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 125(1), pp. 353–360, (2012).

[166] F. P. T. J Van der Burgt, « Crystallization of isotactic polypropylene: the influence of stereo-defects ». Technische Universiteit Eindhoven, (2002).

[167] H. G. deLorenzi H. F. Nied C. A. Taylor, « A Numerical/Experimental Approach to Software Development for Thermoforming Simulations ». *J. Pressure Vessel Technol*, Vol. 113(1), pp. 102-114, (1991).

[168] P. R. Gillah, Mark Irle, Samuel A Amartey, « Development and production of laboratory scale novel MDF panels from composite and nonwoven mattresses of sisal and wood fibre mixtures ». *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 58(5), pp.324-330, (2000).

[169] John Goff and Tony Whelan, « The Dynisco Extrusion Processors Handbook ». Don DeLaney, 2nd edition, (2000).

[170] D. J. Gardner, Y. Han, L. Wang, « Wood–Plastic Composite Technology ». *Journal of Current Forestry Reports*, Vol.1, pp. 139-150, (2015).

[171] M. Baillif, K. Oksman, « The Effect of Processing on Fiber Dispersion, Fiber Length, and Thermal Degradation of Bleached Sulfite Cellulose Fiber Polypropylene Composites ». *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 22(2), pp. 115-133, (2009).

[172] Karin M. Bogren, E. Kristofer Gamstedt, R. Cristian Neagu, « Dynamic–Mechanical Properties of Wood–Fiber Reinforced Polylactide: Experimental Characterization and Micromechanical Modeling ». *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19(6), pp. 613-637, (2006).

[173] L. Di Gioia, « Obtention et étude de biomatériaux à base de protéines de maïs ». Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, (1998).

[174] C.Genau, « Procédé d’élaboration d’agromatériau composite naturel par extrusion bibis et injection moulage de tourteau de tournesol ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, (2006).

[175] O. Orliac, « Valorisation des protéines de tournesol : étude de leur comportement thermique, rhéologique et de leur réactivité chimique - Application à la fabrication de

nouveaux matériaux biodégradables ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse (2002).

[176] J.J.G. van Soest, D. Lewin, H. Dumont, F.H.J. Kappen, « Pea : An Interesting Crop for Packaging Applications ». Royal Society of Chemistry, Vol.276, pp. 267-274, (2001).

[177] F. Silvestre, A. Gaset, L. Rigal, and J. Leyris, « Method for making shaped objects from a vegetable raw material by pressing ». Journal of Macromolecular Science, Part C, Polymer Reviews, Vol. 42, Issue 4, (2000).

[178] Beg, M. D. H, « The Improvement of Interfacial Bonding, Weathering and Recycling of Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites ». Thèse de Doctorat, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, (2007).

[179] J. L. Julson, G. Subbarao, D. D. Stokke, H. H. Gieselman, « Mechanical Properties of Biorenewable Fiber/Plastic Composites ». Journal of Applied Polymer Science, Vol.93, Issue5, pp. 2484-2493, (2004).

[180] J.A. Youngquist, A.M. Krzysik, J.H. Muehl, C. Carll, « Mechanical and physical properties of airformed wood fiber/polymer fiber composites ». Forest products journal, Vol. 42, issue 6, pp. 42-48, (1992).

[181] M. A. Bouabdallah, « Etude comparative du beton haute performance et un beton ordinaire soumises à un chargement thermomecaniques ». Actes des 6ème Journées de Mécanique de l'Ecole Militaire Polytechnique, Bordj El Bahri, Alger (2008).

[182] B.V. Kotka, C. Daneault, A.D. Beshay, « Use of grafted aspen fibers in thermoplastic composites IV: Effects of extreme conditions on mechanical properties of polyethylene composites». Polym. Compos, Vol.7 (5), pp.337-348, (1986).

[183] A.B. Oladipo and I.S. Wichman, « Experimental study of opposed flow flame spread over wood fiber/thermoplastic composite materials ». Combustion and Flame, Vol.118 (3), pp.317-326, (1999).

[184] A.D. Beshay, B.V. Kotka, C. Daneault, « Use of wood fibers in thermoplastic composites II: polyethylene ». Polym. Compos, Vol.6 (4), pp.261-271, (1985).

[185] A.B. Oladipo, I.S. Wichman, J.V. Beck, « Experimental investigation of the thermal properties of wood fiber/thermoplastic composites ». J. Compos. Mater, Vol.33 (5), pp.480-495, (1999).

- [186] K. Yam, V. Kalyankai, S. Selke, C. Lai, « Mechanical properties of wood fiber/recycled HDPE composites ». ANTEC, 1809-1811, (1998).
- [187] G.E. Myers, I.S. Chahyadi, C. Gonzalez, C.A. Coberly, “Wood flour and polypropylene or high density polyethylene composites: Influence of maleated polypropylene concentration and extrusion temperature on properties ». Proc. 1st Wood Fiber-Plastic Composite Conference, Madison, WI, (1993).
- [188] S-M. Lai, F-C. Yeh, Y. Wang, H-C. Chan, H-F. Shen, « Comparative study of maleated polyolefins as compatibilizers for polyethylene/wood flour composites ». J. App. Polym. Sci., 87, 487-496, (2003).
- [189] H. Dalvåg, C. Klason, H.E. Stromvall, « The efficiency of Cellulosic fillers in common thermoplastics part II, Filling with processing aids and coupling agents ». Int. J. Polymeric Mater, 11, 9-38, (1985).
- [190] P. Jandura, B.V. Kotka, B. Riedl, « Cellulose fibers/polyethylene hybrid composites: Effects of long chain organic acid cellulose esters and organic peroxide on rheology and tensile properties ». J. Reinf. Plast. Compos, Vol.20 (8), pp.1354-1365, (2001).
- [191] S. Mishra, J.B. Naik, « Studies on swelling behavior of wood polymer composites based on agrowaste and HDPE in steam and water at ambient temperature». Polym. Plast. Technol. Eng., Vol. 38(5), pp.1051-1058, (1999).
- [192] X. Colom, F. Carrasco, P. Pagès, J. Cañavate, « Effects of different treatments on the interface of HDPE/lignocellulosic fiber composites ». Compos. Sci. Tech.,Vol. 63, pp.161-169, (2003).
- [193] M. Faessel, « Mise en forme de panneaux de fibres de bois par insertion de polymère thermoplastique ». Mémoire de DEA de l’Université Bordeaux I, France, (1999).
- [194] H. Chtourou, B. Riedl, B.V, Kotka, « Strength properties of lignocellulosic/Polyethylene paper with regard to treated polyethylene. Pulp proportion and interfiber acid/base interactions ». Tappi J., Vol.80 (4), pp.141-151, (1997).
- [195] G. Kalaprasad, Pradeep, Mathew, Pavithran, Thomas, « Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low-density polyethylene composites reinforced with

sisal, glass and intimately mixed sisal/glass fibers ». *Compos. Sci. Tech.*, Vol.60, pp.2967-2977, (2000).

[196] R.H. Marchessault, B. Fisa, J.F. Revol, « Nascent polyethylene-cellulose composite ». *Cellulose Technology Research, ACS Symp Ser*, Vol.10, pp.147-158, (1979).

[197] P. Yang, H. Sasaki, O. Pulido, R. Abdul-Kader, « Molding Wood-based Composites I, Mechanical and dimensional stability properties ». *Mem.Fac.Educ.Kumamoto Univ. Nat. Sci.*, Vol.43, pp.117-123, (1994).

[198] P. Yang, H. Sasaki, « Molding Wood-based Composites II: Deformation and stress distribution during Mold pressing ». *Mem.Fac.Educ.Kumamoto Univ. Nat. Sci.*, Vol.43, pp.125-131, (1994).

[199] F.M.B. Coutinho, T.H.S. Costa, « Performance of polypropylene-wood fiber composites ». *Polym. Test.*, Vol.18 (8), pp.581-587, (1999).

[200] N.M. Stark, A.R. Sanadi, « Effects of fiber type on the properties of wood-plastic composites ». *Progress in woodfibre-plastic composites conference*, May 25-26, Toronto, Ontario Canada. *Materials and Manufacturing Ontario*, 14p, (2000).

[201] M. Kazayawoko, J.J. Balatinecz, L.M. Matuana, « Surface modification and adhesion mechanisms in wood fiber-polypropylene composites ». *J. Mater. Sci.*, Vol.34, pp. 6189-6199, (1999).

[202] M. Kazayawoko, J.J. Balatinecz, R.N.S. Sodhi, « Xray photoelectron spectroscopy of maleated polypropylene treated wood fibers in a high-intensity thermokinetic mixer ». *Wood Sci. Tech.*, Vol.33 (5), pp.359-372, (1999b).

[203] T.H.S. Costa, D.L. Carvalho, D.C.S. Souza, F.M.B. Coutinho, J.C. Pinto, B.V. Kotka, « Statistical experimental design and modeling of polypropylene-wood fiber composites ». *Polym. Test.*, Vol.19, pp.419- 428, (2000).

[204] T. Czvikovszky, « Electron-beam processing of wood fiber reinforced polypropylene ». *Radiat. Phys. Chem*, Vol.47 (3), pp.425-430, (1996).

[205] M.M. Sain, B.V. Kotka, C. Imbert, «Structure property relationships of wood fiber filled Polypropylene composite ». *Polym. Plastic Technol. Eng.*, 33(1), 89-104, (1994).

- [206] N.M. Stark, « Effect of Species and Particle Size on Properties of Wood-Flour-Filled Polypropylene Composites ». Proceedings of Functional Fillers, December 8-10. Intertech Conference, San Diego, CA, (1997).
- [207] G.E. Myers, I.S. Chayadi, C.A. Coberly, D.S. Ermer, « Wood flour/polypropylene composites: Influence of maleated polypropylene and process and composition variables on mechanical properties ». *Inter. J. Polymeric Mater*, 15, 21-44, (1991).
- [208] K. Oksman, C. Clemons, « Mechanical properties and morphology of impact modified polypropylene-wood flour composites ». *J. App. Polym. Sci.*, Vol. 67, pp.1503-1513, (1998).
- [209] A.M. Krzysik, J.A. Youngquist, G.E. Myers, I.S. Chahyadi, P.C. Kolosick, « Wood-polymer bonding in extruded and nonwoven web composites panels ». Madison, USA, Forest Products Laboratory, 183, (1991).
- [210] M.N. Ichazo, C. Albano, J. Gonzalez, R. Perera, M.V. Candal, « Polypropylene/wood flour composites: Treatments and properties ». *Compos. Struct.*, Vol.54, pp.207-214, (2001).
- [211] N. Côté, « Composite Bois-Plastique, Influence de la concentration en bois et en agent liant sur les propriétés physico-mécaniques du matériau ». Mémoire de Maîtrise de l'Université Laval, Département des sciences du bois, Québec, (2002).
- [212] C.M. Clemons, D.F. Caulfield, A.J. Giacomini, « Dynamic fracture toughness of cellulose fiberreinforced polypropylene: Preliminary investigation of microstructural effects ». *J. Elast. &Plast*, Vol.31 (4), pp.367-378, (1999).
- [213] A. Amash, P. Zugenmaier, « Morphology and properties of isotropic and oriented samples of cellulose fibre polypropylene ». *Polymer*, Vol.41, pp.1589-1596, (2000).
- [214] A.R. Sanadi, D.F. Caulfield, R.E. Jacobson, R.M. Rowell, « Renewable agricultural fibers as reinforcing fillers in plastics: Mechanical properties of kenaf fiber-polypropylene composites ». *I&EC Research*, Vol.34 (5), pp.1889-1896, (1995).
- [215] H.D. Rozman, G.S. Tay, R.N. Kumar, A. Abubakar, H. Ismail, « Polypropylene hybrid composites: A preliminary study on the use of glass and coconut fiber as reinforcements in polypropylene composites. *Polym.-Plast* ». *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, Vol.38 (5), pp.997-1011, (1999).

- [216] N.E. Zafeiropoulos, D.R. Williams, C.A. Baillie, F.L. Matthews, « Engineering and characterisation of the interface in flax fibre/polypropylene composite materials. Part I. Development and investigation of surface treatments ». *Compos. Part A*, pp.1083-1093, (2002).
- [217] Jayaraman Krishnan, « Manufacturing sisal-polypropylene composites with minimum fiber degradation ». *Compos. Sci. Tech.*, 63, 367-374, (2003).
- [218] P.V. Joseph, K. Joseph, S. Thomas, C.K.S. Pillai, V.S. Prasad, G. Groeninckx, M. Sarkissova, , « The thermal and crystallisation studies of short sisal fibre reinforced polypropylene composites ». *Compos. Part A*, Vol. 34, pp. 253-266, (2003).
- [219] P.V. Joseph, G. Mathew, K. Joseph, G. Groeninckx, S. Thomas, « Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites ». *Compos. Part A*, Vol. 34, pp. 275-290, (2003).
- [220] H. U. Yoon, « Properties of a wood fiber/polypropylene composite made using turbulent air/mixing method ». *Proc.4th International Conference on Wood Fiber-Plastic Composites*, Madison, USA, 306, 12-14 may (1997).
- [221] R.L. Geimer, C.M. Clemons, J.E. Wood jr, « Density range of compression-molded polypropylene wood composites ». *Wood Fib. Sci.*, Vol.25 (2), pp.163-169, (1993).
- [222] R. Mahlberg, L. Paajanen, A. Nurmi, A. Kivisto, K. Koskela, R.M. Rowell, « Effect of chemical modification of wood on the mechanical and adhesion properties of wood fiber/polypropylene fiber and polypropylene/veener composites ». *Holz als Roh- und Werk-*, Vol.59, pp.319-326, (2001).
- [223] B. Riedl, J. Dubois, « Wood-polypropylene composites: A multi-laminated panel and a fiber reinforced particleboard panel. Fourth Int ». *Fourth Int. Conf. On Woodfiber-Plastic Composites*, Madison, Wisconsin, USA, 12-14 may (1997).
- [224] K. Oksman, « Mechanical properties of natural fibre mat reinforced thermoplastic ». *App. Compos. Mater*, Vol.7, pp.403-414, (2000).
- [225] G. Canché-Escamilla, J.I. Cauich-Cupul, E. Mendizabal, J.E. Puig, H. Vasquez-Torres, P.J. Herrera- Franco, « Mechanical properties of acrylate-grafted henequen cellulose fibers and their application in composites ». *Compos. Part A: App. Sci. Manuf.*, Vol.30, pp.349-359, (1999).

- [226] F.P. Liu, M.P. Wolcott, D.J. Gardner, T.G. Rials, « Characterization of the interface between cellulosic fibers and a thermoplastic matrix ». *Compos. Interfaces*, Vol.2 (6), pp.419-432, (1994).
- [227] S. Doroudiani, M.T. Kortschot, « Sorption of carbon dioxide in wood-fiber/polystyrene composites ». *SPE ANTEC*, (1999).
- [228] D. Maldas, B.V. Kotka, « Effects of coating treatments on the mechanical behavior of wood-fiberfilled polystyrene composites I. Use of polyethylene and isocyanate as coating components ». *J. App. Polym. Sci.*, Vol.40, pp.917-928, (1990).
- [229] A.K. Bledzki, J. Gassan, « Composites reinforced with cellulose based fibres ». *Prog. Polym. Sci.*, Vol.24, pp.221-274, (1999).
- [230] D.N.S. Hon, W.Y. Chao, « Composites from benzylated wood and polystyrenes: Their processability and viscoelastic properties ». *J. App. Polym. Sci.*, 50, 7-11, (1993).
- [231] B.V. Kotka, R. Chen, C. Daneault, J.L. Valade, « Use of wood fibers in thermoplastic composites ». *Polym. Compos*, Vol.4 (4), pp. 229-232, (1983).
- [232] C. Klason, J. Kubat, H.E. Strömvall, « The efficiency of cellulosic fillers in common thermoplastics. Part 1 Filling without processings aids or coupling agents ». *Inter. J. Polymeric Mater*, Vol.10, pp.159-187, (1984).
- [233] M.I. Aranguren, N.E. Marcovich, M.M. Reboredo, « Composites made from lignocellulosics and thermoset polymers ». *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 353, pp.95-108, (2000).
- [233] J. Gomez-Bueso, M. Westin, R. Torgilsson, P.O. Olesen, R. Simonson, « Composites made from acetylated lignocellulosic fibers of different origin part I: Properties of dry-formed fiberboards ». *Holz als Roh- und Werk-*, Vol.57, pp. 433-438, (1999).
- [234] J.Gomez-Bueso, M. Westin, R. Torgilsson, P.O. Olesen, R. Simonson, « Composites made from acetylated lignocellulosic fibers of different origin part II: The effect of nonwoven mat composition upon molding ability ». *Holz als Roh- und Werk-*, Vol.57, pp.178-184, (1999).
- [235] J. Simonsen, R. Jacobsen, R. Rowell, « Wood-fiber reinforcement of styrene-maleic anhydride copolymers ». *J. App. Polym. Sci.*, Vol.68, pp.1567-1573, (1998).

- [236] A.R. Sanadi, S.V. Prasad, Rohatgi, « Natural fibres and agro-wastes as fillers and reinforcements in polymer composites ». *J. Sci. Indus. Res.*, Vol.44, pp.437-442, (1985).
- [237] A.N. Shah, S.C. Lakkad, « Mechanical properties of jute-reinforced plastics ». *Fib. Sci. Technol*, 15, 41-46, (1981).
- [238] Peterson S, Jayaraman K, Bhattacharyya D, « Forming biodegradability of woodfibre-Biopol™ composites ». *Compos. Part A*, Vol.33, pp.1123-1134, (2002).
- [239] A.K. Saha, S. Das, D. Bhatta, B.C. Mitra, « Study of jute fiber reinforced polyester composites by dynamic mechanical analysis ». *J. App. Polym. Sci.*, Vol.71 (9), pp.1505-1513, (1999).
- [240] G. Canché-Escamilla, J. Rodriguez-Laviada, J.I. Cauich-Cupul, E. Mendizabal, J.E. Puig, P.J. Herrera- Franco, « Flexural, impact and compressive properties of a rigid-thermoplastic matrix/cellulose fiber reinforced composites ». *Compos. Part A: App. Sci. Manuf.*, Vol.33, pp.539-549, (2002).
- [241] M.C. Timar, K. Maher, M. Irle, M.D. Mihai, « High performance wood-fibre/plastic composites by chemical modification ». *Proc. Of the Third Panel Products Symposium*, Llandudno, Wales, UK, (1999).
- [242] M.A. Khan, M. Idriss Ali, « Effect of moisture and heat on mechanical properties of wood and woodplastic composite ». *Polym. Plast. Tech. Eng.*, Vol.32 (1&2), pp. 5-13, (1993).
- [243] S.B. Elvy, G.R. Dennis, Ng. Loo-Teck, « Effects of coupling agent on the physical properties of woodpolymer composites ». *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol.48, pp.365-372, (1995).
- [244] J. Seena, M.S. Sreekala, Z. Oommen, P. Koshy, S. Thomas, « A comparison of the mechanical properties of phenol formaldehyde composites reinforced with banana fibres and glass fibres ». *Compos. Sci. Tech.*, Vol.62 (14), pp.1857-1868, (2002).
- [245] R. Agrawal, N.S. Saxena, K.B. Sharma, S. Thomas, « Activation energy and crystallization kinetics of untreated and treated oil palm fibre reinforced phenol formaldehyde composites ». *Mater. Sci. Eng. A*, Vol.277, pp.77-82, (2000).
- [246] M.S. Sreekala, G. Jayamol, M.G. Kumaran, T. Jabu, « The mechanical performance of hybrid phenolformaldehyde- based composites reinforced with glass and oil palm fibres ». *Compos. Sci. Tech.*, Vol. 62, pp.339-353, (2002).

[247] F.H.M.M. Costa, J.R.M. D'Almeida, « Effect of water absorption on the mechanical properties of sisal and jute fiber composites ». Polym. Plast. Tech. Eng., Vol.38 (5), pp.1081-1094, (1999).

[248] F.R. Cichocki Jr, J.L. Thomason, « Thermoelastic anisotropy of a natural fiber ». Compos. Sci. Tech., Vol.62, pp.669-678, (2002).

Annexes

Annexe 1

- **Procédés de fabrication des CBP**

Il existe deux grandes techniques de fabrication des composites (CBP) : les techniques plasturgistes et les techniques industrielles.

- **Techniques plasturgistes**

Les techniques plasturgistes ont pour point commun la réalisation du mélange des matières premières à une température correspondant à une phase liquéfiée des plastiques. Ce dispositif permet de réaliser un mélange homogénéisé de fibres cellulosiques et d'un thermoplastique à haute température. Une fois le mélange réalisé, il est possible de fabriquer le produit par extrusion, compression ou injection, Ce mélange à chaud est obtenu de plusieurs manières et conduit à différents modes de fabrication.

L'utilisation d'un dispositif de mélange thermocinétique permet de réaliser un mélange homogénéisé à haute température de fibres cellulosiques et d'un thermoplastique. Une fois le mélange réalisé, il est possible de fabriquer le produit par thermoformage (moulage sous compression/injection/extrusion). Il est important de noter que les paramètres de fabrication comme la vitesse de rotation du mélangeur, la température, le temps, l'humidité et autres, influencent les propriétés du composite produit. L'extrusion d'un mélange de fibres cellulosiques et d'un thermoplastique est une technique qui permet la réalisation complète du composite [167].

Les fibres sont incorporées au thermoplastique fondu à l'aide d'un système de vis. L'ensemble ressort de l'extrudeuse sous la forme d'un profilé. Cette fois encore, les paramètres machines gouvernent les propriétés du composite. La conception et le développement d'un équipement spécifique à l'usage des matières cellulosiques montrent bien l'intérêt et les difficultés rencontrés par ce type de procédé appliqué aux fibres naturelles (principalement des farines de bois ou bien des fibres de bois relativement courtes). Les mêmes remarques sont applicables au moulage par injection.

L'injection ou procédé RTM « Resin Transfer Moulding » est une autre façon de produire des CBP. Le fait qu'il soit question d'un moulage nécessite l'utilisation de fibres plus longues et généralement implique une matrice thermodurcissable.

- **Techniques de l'industrie bois**

La technique de fabrication de composites à base de bois par compression est largement utilisée dans l'industrie de bois. Une large variété de fibres de bois ou synthétiques peut être assemblée en un matelas aléatoire ou bien orienté.

Il s'agit, à la suite de la conformation du matelas par dépôt de couches successives, de réaliser la consolidation thermomécanique grâce à des presses multi-plateaux ou continues. Le matelas peut se composer comme un mélange homogène ou stratifié. Les composites produits par cette technique sont en majorité des panneaux bien que l'on puisse fabriquer des pièces moulées.

Les produits fabriqués par compression (technique des non-tissés) ont un potentiel supérieur en ce qui concerne leurs propriétés mécaniques et leur capacité à épouser des formes complexes. La structure des non-tissés permet d'obtenir des matériaux rigides et légers.

C'est pourquoi, l'usage de fibres naturelles longues dans des moulages par compression est en constante croissance dans l'industrie automobile. À l'échelle du laboratoire, l'absence d'équipement lourd a amené les chercheurs à utiliser une technique plus simple à mettre en œuvre. Cette technique est similaire à celle des non-tissés. Elle diffère essentiellement lors de la phase de conformation du matelas. La conformation se fait dans ce cas de façon manuelle [168,169].

➤ **Extrusion**

L'extrusion est un procédé de fabrication et de transformation de matières à l'état granulaire ou poudre en un profilé [170]. Lors de l'extrusion, les fibres sont mélangées au thermoplastique fondu à l'aide d'un système de vis. L'ensemble ressort de l'extrudeuse sous forme d'un profilé.

Le système d'extrusion se divise habituellement en trois zones [171] : l'alimentation, la compression et le pompage. La zone d'alimentation permet la plastification du polymère. Ensuite, le matériau va être compressé dans la deuxième zone. Cette étape assure un dégazage du fondu. Enfin, le polymère est homogénéisé dans la zone de pompage. La sortie de l'extrudeuse (filière) donnera la forme finale à l'extrudé. La figure A1.1 illustre le procédé d'extrusion.

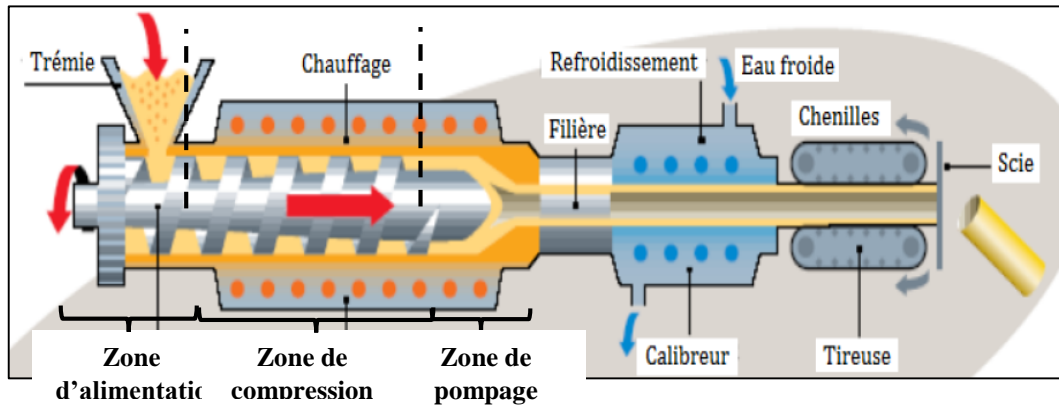


Fig.A1.1. Schéma d'une extrudeuse.

La vitesse de rotation des vis et le profil de température sont des paramètres très importants pour les matériaux extrudés. En effet, en utilisant des vitesses et/ou des températures très élevées, les fibres sont dégradées [172]. Cette technique produit souvent une dégradation importante des fibres et engendre des cassures [173].

L'extrusion est le procédé le plus utilisé pour la fabrication des composites. Elle présente l'avantage de fonctionner en continu quand cette technologie n'est pas utilisée pour la mise en forme d'un produit fini (film, plaque, profilé, tube, ...).

➤ Compression

Le thermo pressage est également appelé moulage par compression [174].

Le mélange est chargé dans le moule chauffé par conduction. Les plateaux de la presse se rapprochent et viennent comprimer la matière qui ramollit et prend la forme de l'empreinte. Le moule est maintenu fermé sous pression pendant le temps de la réaction de réticulation du thermodurcissable. Lorsque celle-ci est terminée, les plateaux s'écartent l'un de l'autre et la pièce est dégagée (figure A1.2).

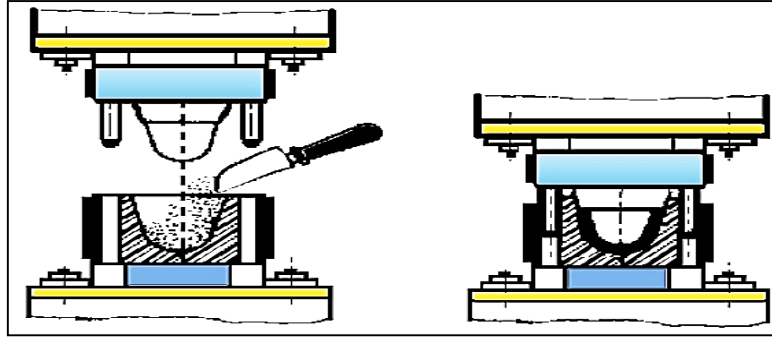


Fig.A1.2. Moulage par compression d'après Trotignon.

La température doit être choisie de façon à ne pas provoquer la dégradation thermique à la fibre. On procède à un refroidissement rapide du moule pour limiter la coalescence des cellules.

Le thermo pressage est la technologie décrite comme la plus facile à mettre en œuvre avec les bio polymères comme les protéines [175,176], dont le comportement se rapproche de celui des thermodurcissables, mais aussi comme l'amidon [177], ou les composites fibres ligno-cellulosiques / protéines comme le tourteau de tournesol [178].

➤ Injection

L'injection est un procédé semi-continu dans lequel un polymère fondu est injecté d'abord, dans un moule tempéré et retenu sous pression. Puis, on le retire lorsqu'il est solidifié.

En fait, une presse à injection peut être représentée comme un hybride entre une extrudeuse et une presse à compression. Comme l'extrusion, la résine est incorporée dans une trémie et plastifiée par une vis d'accumulation.

À la différence de l'extrusion, la vis de la presse recule à mesure que s'effectue la plastification. Le polymère fondu et homogénéisé, s'entasse à l'avant de la vis dans la zone d'accumulation. Lorsqu'une quantité prédéterminée de polymère a été plastifiée, la vis agit comme un piston et injecte la résine à haute pression vers le moule tempéré. Avec ce procédé, on peut fabriquer une large variété de produits pour différentes applications. En particulier, les CBP fabriqués par injection ont l'avantage d'avoir des

performances supérieures à ceux fabriqués par extrusion puisque les fibres de bois, dans ce cas, sont mieux orientées dans la matrice plastique. De plus, leur conception est simple et ils ont une excellente finition.

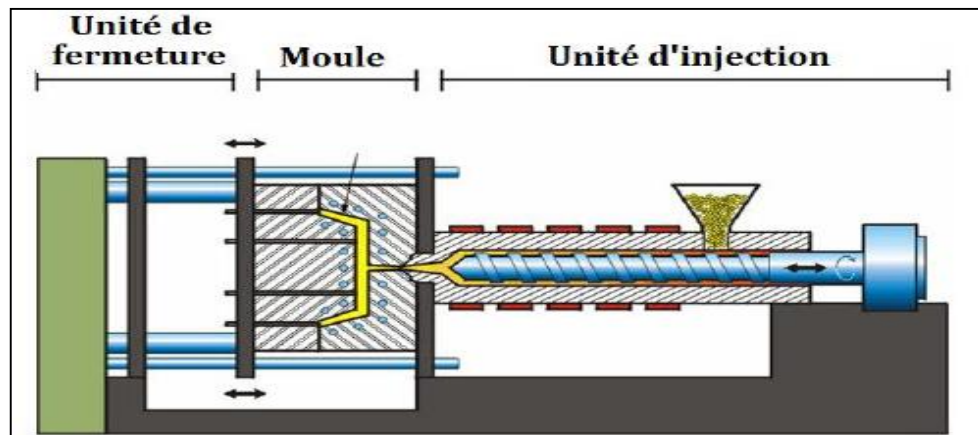


Fig.A1.3. Schéma du procédé d'injection.

➤ Imprégnation

L'imprégnation est un type de traitement agissant par pénétration d'un produit dans le bois. Suivant le procédé de mise en œuvre, la nature du bois et la formule du produit, l'imprégnation peut être profonde, ou n'intéresser que l'épaisseur ou la périphérie des pièces traitées.

➤ Thermo consolidation

Il s'agit de la fabrication de composites à base de bois par compression d'un matelas de fibres, de copeaux ou particules liées par un additif. Une large variété de fibres de bois ou synthétiques peut être assemblée en un matelas aléatoire ou orienté. Les produits fabriqués par cette technique ont de bonnes propriétés mécaniques permettant ainsi d'obtenir à la fois des matériaux rigides et légers.

Les composites bois/plastiques conçus par formation d'un matelas fibreux présentent des propriétés supérieures à celles du MDF [179].

Dans cette étude, il a été prouvé que la nature du bois et du polymère plastique, leur proportion ainsi que les liaisons internes entre fibres et matrice sont les plus importants paramètres qui contrôlent les propriétés physico-mécaniques des composites.

Les composites formés par thermo consolidation sont beaucoup moins étudiés et moins nombreux que les composites issus des techniques plasturgistes. Une étude a montré l'importance du rôle de la densité du matériau sur ces propriétés puisqu'il existe une importante corrélation entre ces deux paramètres [180].

- **Classifications des CBP**

En général, la grande variété des panneaux de particules et les panneaux de fibres conduit à une multiplicité de critères de classification de ces composites. En effet, la nature et la géométrie des éléments de renfort, la nature de la matrice, la proportion renfort/matrice, la spécificité fonctionnelle des panneaux, les conditions de leur utilisation, la densité ainsi que les procédés de fabrication sont parmi les critères de classification des panneaux de particules.

Selon la norme EN 309 (1992), les panneaux de particules sont classés suivant 6 critères :

- **Le procédé de fabrication** : les panneaux pressés à plat, les panneaux à pressage par cylindre et les panneaux extrudés pleins ou tubulaires.
- **L'état de la surface** : les panneaux de particules permettent de définir les panneaux bruts non poncés, des panneaux poncés ou rabotés, des panneaux revêtus avec un verni ou une peinture et des panneaux revêtus sous pression avec un matériau solide par placage tels que les panneaux de particules surfacés mélaminés (PPSM) et enfin des panneaux surfacés papier sec ou revêtus d'un stratifié décoratif.
- **La forme** : les panneaux de particules sont plats, en forme ou en chant profilé.
- **La dimension et la forme des particules** : on distingue des panneaux de particules arrondies, de particules plates (waferboard), de particules en lamelles minces, longues et orientées (Oriented Strand Board OSB) et des panneaux avec d'autres types de particules comme les anas de lin.

- **La structure du panneau** : les panneaux peuvent être monocouches, et plus fréquemment "trois couches", ou multicouches avec souvent différents types de particules disposées avec ou sans orientation spécifique.
- **Suivant l'usage et les conditions d'utilisation des panneaux** : la norme EN 312 définit 7 types de panneaux de particules P1 – P7 à savoir :
 - P1 : Panneaux pour usage général en milieu sec.
 - P2 : Panneaux pour agencements intérieurs (y compris les meubles) utilisés en milieu sec.
 - P3 : Panneaux non travaillants utilisés en milieu humide
 - P4 : Panneaux travaillants utilisés en milieu sec
 - P5 : Panneaux travaillants utilisés en milieu humide
 - P6 : Panneaux travaillants sous contrainte élevée utilisés en milieu sec
 - P7 : Panneaux travaillants sous contrainte élevée utilisés en milieu humide

Ces panneaux peuvent être traités pour en améliorer la résistance vis-à-vis des attaques biologiques ou pour leur conférer des propriétés d'isolation acoustique, ...

Une synthèse bibliographique consacrée aux polymères synthétiques les plus communes menées par FRANCK Michaud en 2003 [181] est donnée au tableau A.1.1 et A.1.2. L'auteur précité a d'abord procédé au classement par polymère, puis par procédé et enfin par la nature des fibres biologiques employées. Il a associé au tableau un bref aperçu des préoccupations des auteurs intéressés par ce type de matériaux.

Tableau.A1.1 Classifications des études sur les composites (CBP) selon le polymère utilisé.

Polymère	Procédé	Renfort	Spécificités	Auteurs		
PE	Mélange	Fibres de bois	Greffage, conditions extrêmes propriétés thermiques modification, pptés physiques résistance au feu pptés mécaniques	Kotka et al 1986 ^[182] Oladipo et al 1999 ^[183] Beshay et al 1985 ^[184] Oladipo et Wichman 1999 ^[185] Yam et al 1998 ^[186]		
		Farine de bois	Effets des procédés adhésion, élastomère, DMTA MAPP, T° d'extrusion sur pptés MAPE, MAPP, SEBS-MA	Oksman et Lindberg 1998 ^[110] Myers et al 1993 ^[187] Lai et al 2003 ^[188]		
		Cellulose	Agents, pptés physiques Rhéologie (acide cellulosique ester)	Dalvåg et al 1985 ^[189] Jandura et al 2001 ^[190]		
		Déchets agricoles Lignocellulosiques	Comportement de gonflement, MA Différents traitements d'interface	Mishra et Naik 1999 ^[191] Colom et al 2003 ^[192]		
PE	Réseau fibreux	Fibres de bois	Stratifié « air laid »	Faessel 1999 ^[193]		
		Déchets agricoles Lignocellulosiques	Comportement de gonflement, MA Papier : interactions, IGC	Mishra et Naik 1999 ^[191] Chtourou et al 1997 ^[194]		
		fibres naturelles	Hybride (fibre de verre) : pptés (T°)	Kalapasad et al 2000 ^[195]		
		Papier	Encapsulation, pptés, photos	Marchessault et al 1979 ^[196]		
PET	Réseau fibreux	Fibres de bois	(MDF/PF) pptés méca + stabilité (MDF/PF) déformation, moulage	Yang et al 1994 ^[197] Yang et Sasaki 1994 ^[198]		
		Fibres naturelles	Ciguë + PF pptés physiques	Youngquist et al 1992 ^[180]		
PP	Mélange	Fibres de bois	(MAPP, silane) + pptés + %bois effets des fibres, interface, modification, pptés (PP+MAPP), pptés, plan factoriel « electron beam », pptés (T°) MAPP, pptés (T°), cristallinité	Coutinho et Costa 1999 ^[199] Stark et Sanadi 2000 ^[200] Kazayawoko et al 1999ab ^[201,202] Costa et al 2000 ^[203] Czvikovszky 1996 ^[204] Sain et al 1994 ^[205]		
			Farine de bois	Effets de tailles (mesh) effets de tailles, facteur de forme effet fibres, pptés (MAPP) MAPP, T° d'extrusion sur pptés pptés, morpho, MAPP, élastom pptés (MAPP)	Stark 1997 ^[206] Stark et Sanadi 2000 ^[200] Myers et al 1991 ^[207] Myers et al 1993 ^[187]	
				Cellulose (fibres)	Silane, MAPP, Melt Index concentration en bois, MAPP Fibres, fracture morpho+pptés DMTA, DSC	Oksman et Clemons 1998 ^[208] Krzysik et al 1991 ^[209] Ichazo et al 2001 ^[210] Côté 2002 ^[211] Clemons et al 1999 ^[212]
			Fibres naturelles	Kenaf, injection, pptés hybride (verre), noix de coco, pptés Flax, interface IGC, Xray, acétylat° Sisal, problèmes de dégradations Sisal, agents, zone transcristalline	Amash et Zugenmaier 2000 ^[213] Sanadi et al 1995 ^[214] Rozman et al 1999 ^[215] Zafeiropoulos et al 2002 ^[216] Jayaraman 2003 ^[217] Joseph et al 2003ab ^[218,219]	
		Fibres de bois		Pptés influence du taux de compression hybride (PF), pptés, MA, SA pptés physiques (MAPP)	Yoon 1997 ^[220] Geimer et al 1993 ^[221] Mahlberg et al 2001 ^[222] Krzysik et al 1991 ^[209]	
				Papier recyclé	Stratifié, pptés, adhésion	Riedl et Dubois 1997 ^[223]
				Fibres naturelles	NMT, pptés, T°, autres renforts	Oksman 2000 ^[224]

Tableau.A1.2 Suite de la classification des études sur les composites (CBP) selon le polymère utilisé.

Polymère	Procédé	Renfort	Spécificités	Auteurs
PVC	Mélange	Farine de bois	Effets bois, pptés, tenue à l'eau	Takatani et al 2000 ^[109]
		Fibres de cellulose	Greffage, adhésion	Canché-Escamilla et al 1999 ^[225]
PS	Mélange	Fibres de bois	Interface, acétylation, adhésion	Liu et al 1994 ^[226]
			sorption de carbone	Doroudiani et Kortschot 1999 ^[227]
			Effets « coating »	Maldas et Kotka 1990 ^[228]
		Farine de bois	Effets procédés (sciure)	Bledzki et al 1999 ^[229]
			thermoplastification, DMTA (sciure)	Hon et Chao 1993 ^[230]
Cellulose	pptés méca, xanthation	Kotka et al 1983 ^[231]		
PS	Réseau	Pâte à papier	pptés, % bois	Klason et al 1984 ^[232]
			Effets bois, pptés, tenue à l'eau	Takatani et al 2000 ^[109]
PS	Réseau	Pâte à papier	MA (%)	Aranguren et al 2000 ^[233]
			pptés, %	Klason et al 1984 ^[232]
Styrène	Mélange	Fibres de bois	pptés, capacité de formage	Gomez-Bueso et al 1999a ^[233] Gomez-Bueso et al 1999b ^[234]
Polyester	Mélange	Fibres de bois	MA, pptés + DMTA, adhésion	Simonsen et al 1998 ^[235]
		Fibres naturelles	ppté, compare verre, mica	Sanadi et al 1985 ^[236]
Polyester	Réseau	Fibres de bois	Jute, pptés méca (époxy)	Shah et Lakkad 1981 ^[237]
		Fibres naturelles	biopolymère, pptés	Peterson et al 2002 ^[238]
Polyester	Mélange	Fibres naturelles	pptés dynamiques (jute)	Saha et al 1999 ^[239]
PMMA	Mélange	Cellulose (fibres)	pptés matrice rigide	Canché-Escamilla et al 2002 ^[240]
		Sciure de bois	greffage	Canché-Escamilla et al 1999 ^[225]
MMA	Réseau	Fibre de bois	MA, GMA, pptés (eau), images	Timar et al 1999 ^[241]
		Fibre de bois	pptés méca, T°, humidité	Khan et Idriss 1993 ^[242]
PF	Réseau	Fibres naturelles	Traitement, silane, pptés	Elvy et al 1995 ^[243]
			Hybride (banane/verre)	Adhésion, effets fibres (palmier à huile), silane, alkali, Cristallisation ; pptés
Epoxy	Réseau	Jute	Absorption d'eau, pptés méca	Costa et D'Almeida 1999 ^[247]
		Jute/verre	Anisotropie thermique des fibres naturelles, DMTA	Cichocki et Thomason 2002 ^[248]

Note : Pptés : propriétés, T° : température, Morpho : morphologie, Acétylat° : acétylation, Elastom : élastomère, méca : mécaniques, MA : anhydride maléique, SA : anhydride succinique, MAPP : polypropylène maléaté, MAPE : polyéthylène maléaté, SEBS-MA : styrèneéthylène/butylène tribloc copolymère greffé avec de l'anhydride maléique, PP : polypropylène, PE : polyéthylène, PET : polyéthylène téréphtalique, IGC : chromatographie gazeuse inverse, DMTA : analyse dynamique thermomécanique, DSC : analyse enthalpique différentielle, MDF : panneau de fibres de moyenne densité, PF : phénol formaldéhyde, Melt Index : indice de fusion, Xray : analyse aux rayons X, NMT : matelas naturel renforçant un thermoplastique, Hybride : composite hybride possédant 3 constituants principaux. GMA : méthacrylate de glycidile, PVC : polychlorure de vnyle, PS : polystyrène, PMMA : poly (méthacrylate de méthyle), MMA : méthyle méthacrylate, PF : phénol formaldéhyde

Annexe 2

Le profil des variations angulaires des indicateurs de contraintes de croissance (ICC) de bois de tension se caractérise, en général, par une forte valeur encadrée par deux valeurs intermédiaires relativement moyennes, les autres valeurs sont plus faibles. Ces variations peuvent être décrites par des fonctions de types sinusoïdales. À partir des profils expérimentaux, nous avons utilisé l'ajustement décrit par le modèle proposé par Sassus [223].

$$ICC(\theta) = ICC_{min} + (ICC_{max} - ICC_{min})m \frac{|\theta - \theta_0|}{\delta\theta}$$

Avec :

θ est la position angulaire variant entre $\theta_{0-\pi}$ et $\theta_{0+\pi}$.

La largeur du pic $\delta\theta$ est définie comme étant l'étendue angulaire où l'ICC est plus proche du maximum que du minimum :

$$ICC(\theta) \geq \frac{ICC_{max} + ICC_{min}}{2} \quad \text{Pour } \theta \in [-\delta\theta, \delta\theta]$$

Les paramètres m et $\delta\theta$ permettent de décrire une large gamme de formes de pic. L'ensemble des paramètres est ajusté par le minimum de la différence des carrés entre la courbe modèle et le profil moyen. Nous avons trouvé, pour l'ajustement $m = 2$, $\theta_0 = 1,5^\circ$ et $\delta\theta = 45^\circ$.

Annexe 3

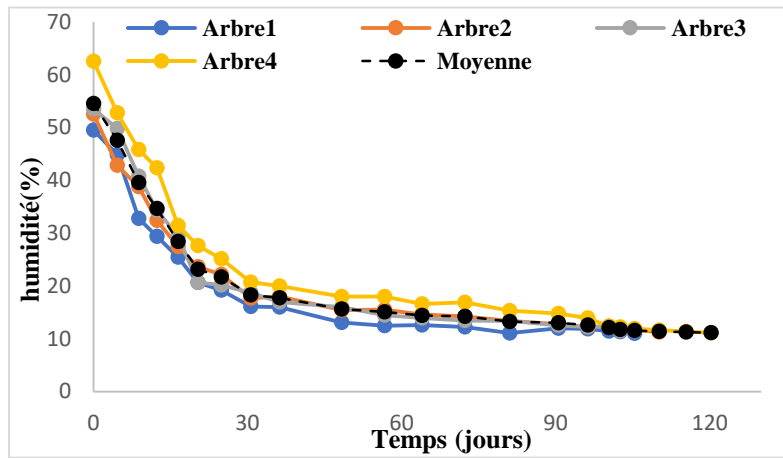
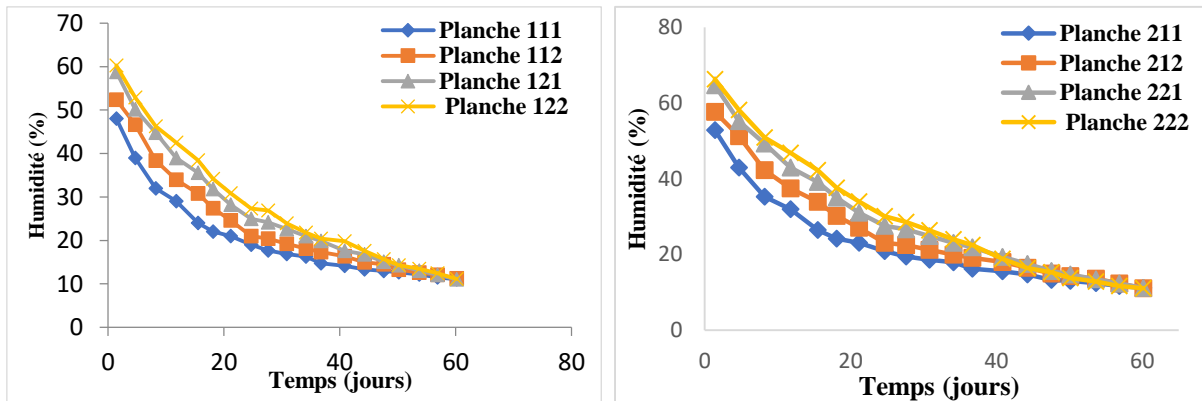
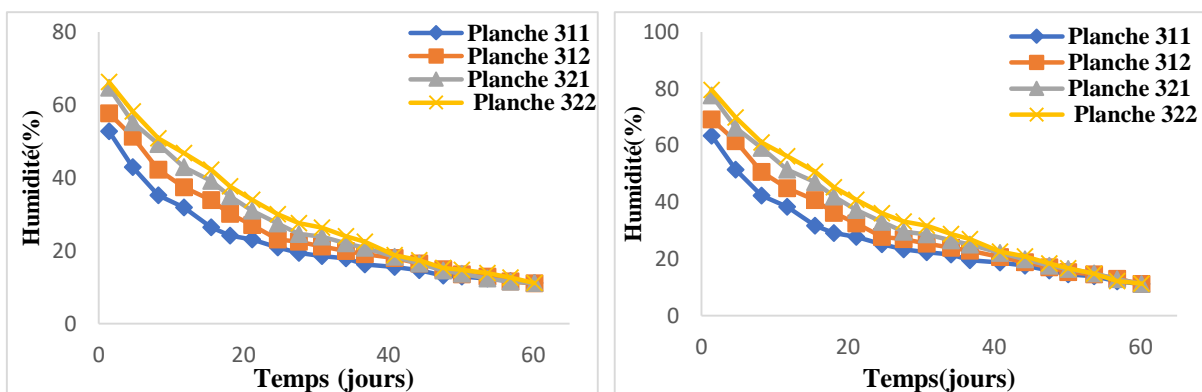


Fig.A3.1 Séchage du bois de pin maritime. Cas du séchage naturel à l'air libre sous abri.



Séchage de quelques planches de l'arbre 1 et 2 à conditions de température et d'humidité relativement constantes ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; $H_r = 11\%$).



Séchage de quelques planches de l'arbre 3 et 4 à conditions de température et d'humidité relativement constantes ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; $H_r = 11\%$).

Fig.A3.2 Séchage des planches de pin maritime par le séchage artificiel.

Annexe 4

Tableau.A4.1 Absorption d'eau et gonflement en épaisseur des CBPEHD

CBP	Densité (kg/m ³)	Absorption de l'eau (%)				Gonflement (%)			
		2h	σ	24h	σ	2h	σ	24h	σ
PEHDr100	925	0,12	0,010	0,22	0,02	0,14	0,012	0,33	0,05
PEHDr 70B30	976	0,35	0,021	0,86	0,07	0,19	0,02	0,44	0,07
PEHDr 60B40	994	0,54	0,034	1,20	0,09	0,28	0,35	0,72	0,09
PEHDr 50B50	1003	0,63	0,055	1,40	0,12	0,44	0,05	0,79	0,12
PEHDr 40B60	1010	1,02	0,072	2,43	0,24	0,51	0,07	1,25	0,18
PEHDr 30B70	1015	1,55	0,091	3,31	0,34	0,63	0,90	1,50	0,24
PEHDr93CC7	941	0,11	0,005	0,5	0,04	0,065	0,005	0,18	0,03
PEHDr63B30CC7	988	0,28	0,008	0,60	0,05	0,08	0,008	0,21	0,05
PEHDr53B40CC7	1007	0,37	0,01	0,82	0,12	0,11	0,01	0,58	0,10
PEHDr43B50CC7	1021	0,49	0,02	1,14	0,15	0,24	0,02	0,89	0,12
PEHDr33B60CC7	1033	0,69	0,04	1,46	0,21	0,38	0,04	1,1	0,15
PEHDr23B70CC7	1043	0,90	0,06	2,30	0,25	1,61	0,06	1,44	0,18
PEHDv100	933	0,14	0,021	0,34	0,06	0,18	0,023	0,42	0,07
PEHDv 70B30	948	0,48	0,04	1,01	0,09	0,22	0,04	0,65	0,09
PEHDv 60B40	962	0,72	0,06	1,54	0,11	0,31	0,06	0,95	0,11
PEHDv 50B50	985	0,92	0,07	1,91	0,16	0,47	0,07	1,34	0,14
PEHDv 40B60	992	1,28	0,09	2,84	0,27	0,58	0,09	1,69	0,2
PEHDv 30B70	1000	1,89	0,12	3,72	0,39	0,72	0,12	1,95	0,25

σ : écart-type

Annexe 5

Tableau.A5.1 Absorption d'eau et gonflement en épaisseur des CBPP

CBP	Densité (kg/m ³)	Absorption de l'eau (%)				Gonflement (%)			
		2h	σ	24h	σ	2h	σ	24h	σ
PPr100	902	0,13	0,024	0,24	0,06	0,16	0,02	0,36	0,05
PPr 70 B30	956	0,41	0,03	0,92	0,09	0,25	0,08	0,59	0,12
PPr 60 B40	964	0,58	0,08	1,5	0,10	0,39	0,11	0,86	0,14
PPr 50 B50	982	0,73	0,12	1,9	0,23	0,60	0,14	1,26	0,23
PPr 40 B60	991	1,2	0,16	2,9	0,31	0,70	0,16	1,60	0,44
PPr 30 B70	1000	1,8	0,05	3,9	0,52	0,83	0,20	1,96	0,77
PP93CC7	921	0,12	0,045	0,4	0,04	0,048	0,07	0,12	0,08
PPr63B30CC7	972	0,32	0,05	0,7	0,05	0,16	0,09	0,40	0,10
PPr53B40CC7	983	0,39	0,08	0,92	0,07	0,26	0,10	0,60	0,14
PPr43B50CC7	994	0,58	0,12	1,23	0,09	0,36	0,12	0,92	0,21
PPr33B60CC7	1011	0,75	0,15	1,95	0,10	0,45	0,15	1,29	0,32
PPr23B70CC7	1021	1,2	0,19	2,74	0,21	0,63	0,19	1,49	0,44
PPv100	892	0,17	0,027	0,42	0,08	0,14	0,09	0,44	0,07
PPv 70 B30	928	0,53	0,09	1,12	0,11	0,23	0,12	0,66	0,14
PPv 60 B40	942	0,82	0,12	1,68	0,19	0,38	0,14	0,79	0,19
PPv 50 B50	965	0,98	0,14	2,13	0,31	0,54	0,19	1,4	0,32
PPv 40 B60	982	1,34	0,19	2,96	0,42	0,66	0,22	1,84	0,54
PPv 30 B70	992	1,98	0,20	3,94	0,50	0,92	0,32	2,23	0,99

σ : écart-type

Annexe 6

Tableau.A6.1 Valeurs de traction et de flexion des CBPEHD.

Composite	Traction				Flexion			
	Résistance	σ	Module	σ	Résistance	σ	Module	σ
PEHDr100	32,09	0,54	1,32	0,11	32,25	1,09	1,16	0,11
PEHDr70B30	21,13	0,64	1,62	0,10	22,95	1,20	1,62	0,12
PEHDr60B40	17,31	0,75	1,75	0,08	19,65	1,29	1,85	0,12
PEHDr50B50	14,47	0,87	1,78	0,12	17,75	1,35	1,98	0,13
PEHDr40B60	11,02	0,98	1,98	0,14	14,85	1,41	2,27	0,13
PEHDr30B70	9,00	1,32	2,12	0,11	13,07	1,57	2,35	0,14
PEHDr93CC7	34,19	0,54	1,49	0,06	34,06	0,43	1,30	0,09
PEHDr63B30CC7	25,25	0,92	1,99	0,09	27,97	0,68	1,94	0,10
PEHDr53B40CC7	22,55	0,97	2,29	0,11	24,36	0,79	2,25	0,10
PEHDr43B50CC7	18,98	0,86	2,37	0,12	23,00	0,84	2,42	0,11
PEHDr33B60CC7	16,09	0,84	2,73	0,13	20,55	0,97	2,71	0,12
PEHDr23B70CC7	14,30	0,82	2,90	0,13	19,57	1,08	2,82	0,13
PEHDv100	29,97	0,58	1,21	0,10	29,94	1,05	1,00	0,13
PEHDv70B30	18,85	0,68	1,42	0,11	18,84	1,29	1,40	0,13
PEHDv60B40	14,67	0,73	1,44	0,10	16,56	1,38	1,50	0,14
PEHDv50B50	11,51	1,07	1,50	0,12	12,88	1,47	1,69	0,15
PEHDv40B60	8,10	1,25	1,64	0,13	10,07	1,60	1,80	0,15
PEHDv30B70	6,00	1,33	1,69	0,13	9,14	1,63	1,83	0,16

Résistance en MPa, Module en GPa et σ = écart-type

Annexe 7

Tableau.A7.1 Valeurs de traction et de flexion des CBPP.

CBP	Traction				Flexion			
	Résistance	σ	Module	σ	Résistance	σ	Module	σ
PPr100	22,08	0,45	0,32	0,12	24,25	0,49	0,56	0,02
PPr70B30	15,13	0,59	0,98	0,11	18,94	0,60	1,32	0,02
PPr60B40	12,31	0,67	1,28	0,09	16,64	0,69	1,46	0,03
PPr50B50	10,97	0,76	1,61	0,09	14,75	0,95	1,70	0,07
PPr40B60	08,81	0,90	1,80	0,11	12,84	0,81	1,76	0,07
PPr30B70	08,09	0,93	1,97	0,10	12,20	1,16	1,83	0,09
PPr93CC7	24,28	0,43	0,42	0,11	25,76	0,43	0,65	0,04
PPr63B30CC7	19,25	0,88	1,36	0,10	22,97	0,88	1,60	0,06
PPr53B40CC7	16,74	0,89	1,78	0,09	21,36	0,89	1,85	0,07
PPr43B50CC7	15,18	0,74	2,11	0,07	20,30	0,74	2,02	0,07
PPr33B60CC7	13,59	0,76	2,41	0,07	19,55	0,76	2,10	0,04
PPr23B70CC7	12,80	0,80	2,56	0,08	19,27	0,68	2,16	0,05
PPv100	20,76	0,49	0,23	0,15	22,94	0,45	0,49	0,06
PPv70B30	13,04	0,60	0,80	0,11	16,84	0,59	1,07	0,06
PPv60B40	10,07	0,69	0,94	0,09	14,05	0,67	1,25	0,08
PPv50B50	08,51	0,95	1,15	0,08	11,87	0,76	1,40	0,08
PPv40B60	06,29	0,81	1,26	0,09	09,37	0,90	1,43	0,08
PPv30B70	05,03	1,26	1,36	0,09	08,54	0,93	1,49	0,10

Résistance en MPa, Module en GPa et σ = écart-type

Annexe 8

Tableau.A8.1 Angles de contact mesurés et calculés des CBPEHDr.

Composites	θ_m	θ_c	
PEHDr70B30	67,63	h=24 d=71	68,12
PEHDr60B40	64,11	h=23 d=72	65,14
PEHDr50B50	53,76	h=20 d=74	56,78
PEHDr40B60	49,02	h=18 d=75	51,28
PEHDr30B70	33,97	h=15 d=97	34,37

θ_m : angle de contact mesuré, θ_c : angle de contact calculé = $2 * \text{Arctg}(2h/d)$.

Tableau.A8.2 Angles de contact mesurés et calculés des CBPPr.

Composites	θ_m	θ_c	
PPr70B30	64,03	h=23 d=72	65,14
PPr60B40	60,14	h=21 d=72	60,51
PPr50B50	49,73	h=18 d=75	51,28
PPr40B60	45,82	h=16 d=77	45,13
PPr30B70	29,07	h=14 d=98	31,89

θ_m : angle de contact mesuré, θ_c : angle de contact calculé = $2 * \text{Arctg}(2h/d)$.

Annexe 9

Tableau.A9.1 Angles de contact mesurés et calculés des CBPEHDr avec 7 % de CaCO₃.

Composites	θ_m	θ_c	
PEHDr63B30CC7	69,95	h=24 d=68	70,43
PEHDr53B40CC7	66,26	h=23 d=69	67,38
PEHDr43B50CC7	55,84	h=20 d=75	56,14
PEHDr33B60CC7	52,88	h=19 d=76	53,13
PEHDr23B70CC7	35,06	h=15 d=90	36,86

θ_m: angle de contact mesuré, θ_c : angle de contact calculé = 2*Arctg (2h/d)

Tableau.A9.2 Angles de contact mesurés et calculés des CBPPr avec 7 % de CaCO₃.

Composites	θ_m	θ_c	
PPr70B30CC7	66,48	h=24 d=72	67,38
PPr60B40CC7	63,85	h=23 d=74	63,73
PPr50B50CC7	53,26	h=19 d=75	53,73
PPr40B60CC7	47,38	h=17 d=77	47,64
PPr30B70CC7	33,11	h=14 d=92	33,85

θ_m: angle de contact mesuré, θ_c : angle de contact calculé = 2*Arctg (2h/d)

Articles

Article 1 : Journal of engineering and applied sciences 13 (9) : 2786-2790, 2018.

Examination of Interfacial Compatibility Within WPC Panels Using Electrical Impedance Spectroscopy.

¹Charaf Lazrak, ²Abdelillah Hakam, ³Maryama Hammi , ⁴Abderrahim Famiri and ⁵Mohsine Ziani

¹*Laboratory of Condensed Matter and Interdisciplinary Sciences (LaMCSi), Faculty of Sciences, Mohammed V University in Rabat, Morocco.*

²*Wood Science Laboratory.*

³*Laboratory of Materials Nanotechnologies and Environnement, Mohammed V University in Rabat, Faculty of Science, PO Box 1014, Rabat, Morocco.*

⁴*Forest Research Center, PO Box 763, Agdal, Rabat, Morocco.*

⁵*National Institute of Archeological Sciences and Patrimony, PO Box 6828, Hay Riad, Rabat, Morocco.*

ABSTRACT

Composite plates containing pine wood particulates and high density Polyethylene (PE) matrix were prepared using thermo-compression and characterized by electrical impedance spectroscopy (EIS) measurements at room temperature and under frequency interval of 40-100 kHz for different wood contents ranging from 40-70%. The double-DCE (ZARC) model was used as equivalent circuit for the obtained plates. The impedance parameters of this model such as intracellular resistance (R_i), extracellular resistances (R_{e1} and R_{e2}), relaxation time (τ_1 and τ_2) and the distributed coefficient of the relaxation time (Ψ_1 and Ψ_2) were determined for the different specimens. Effects of pine powder concentration on interfacial compatibility within the composites were analyzed. The relaxation time increased with increasing wood contents up to 50% and decreased at higher rates. This finding suggests that the optimal interfacial compatibility in wood powder/polyethylene chips composites without additives is attributed to 50% wood content.

KEYWORDS

Composite, Polyethylene, Interfacial compatibility, Electrical impedance spectroscopy, double-DCE (ZARC) model, relaxation time.

Valuation And Characterization Of Maritime Pine (*Pinus pinaster*) Wood From The Maâmora Forest In Plywood Panels

¹Charaf Lazrak, ¹Bousselham Kabouchi, ²Abderrahim Famiri and ³Mohsine Ziani

¹Laboratory of Condensed Matter and Interdisciplinary Sciences (LaMCScI), Faculty of Sciences, Mohammed V University in Rabat, Morocco.

²Forest Research Center, PO Box 763, Agdal, Rabat, Morocco.

³National Institute of Archeological Sciences and Patrimony, PO Box 6828, Hay Riad, Rabat, Morocco.

ABSTRACT

Morocco has undertaken reforestation, since, the 1960's to meet its timber. Among these species, there are softwood in general and especially the Maritime pine (*pinus pinaster*), because of its rapid growth, its relatively short life span and its strong rooting. The physical and mechanical study of 4 trees of the reforested maritime pine (*pinus pinaster*) from the Maâmora forest (Machraa El Kettane) in Morocco at maturation age showed that according to the Growth Stress Indicators (GCI) of the four trees, the maritime pine wood is quite nervous with an average stress of about 75µdef. The sawing performance of the resulting plots is close to 58%, the flows have medium quality, the artificial drying of the planks with moisture content of 54% lasted 165 h. As a result, the final humidity is 10%. The physical and mechanical characteristics allowed to classify this wood in moderately nervous, semi-heavy and soft wood and usable as round wood or in sawn-wood in the manufacture of boxes and carpentry. The wood of from Maritime pin (*pinus pinaster*) from the Maâmora forest (Machraa El Kettane) was subject to transformation into plywood panels. These panels were made in three folds that have density variation between 520 and 550 at 12% moisture, a medium flexural strength of 24 Mpa, an average compressive strength of 25 MPa and a rolling shear that varies between 2.1 and 2.6 MPa. These plywood panels of maritime can be classified as panels with medium density and high rigidity.

KEYWORDS

Maritime Pine, Physical Properties, Mechanical Properties, plywood panel, GCI, Machraa El Kettane.

Structural study of maritime pine wood and recycled high-density polyethylene (HDPEr) plastic composite using Infrared-ATR spectroscopy, X-ray diffraction, SEM and contact angle measurements

Charaf Lazrak^{a*}, Bousselham Kabouchi^a, Maryama Hammi^b, Abderrahim Famiri^c, Mohsine Ziani^d

^a *Laboratory of Condensed Matter and Interdisciplinary Sciences, Mohammed V University in Rabat, Faculty of Sciences, PO Box 1014, Rabat, Morocco.*

^b *Laboratory of Materials Nanotechnologies, and Environment, Faculty of Science, PO Box 1014, Rabat, Morocco.*

^c *Forest Research Center, PO Box 763, Agdal, Rabat, Morocco.*

^d *National Institute of Archeological Sciences and Patrimony, PO Box 6828, Hay Riad, Rabat, Morocco.*

ABSTRACT

In this work, Wood–polymer composites (WPCs) were prepared from pine wood and High-Density Recycled Polyethylene (HDPEr). In order to gain insight of the effect of changing ratios of the wood and the polymer within the elaborated samples, a set of composites were subjected to comparative analysis by X-ray diffraction and Infrared-ATR spectroscopy, the structural investigations revealed that significant blending occurred with woodflour, Scanning Electron Microscopy (SEM) was comparatively carried out over the different wood-polymer composition (HDPEr 70W30; HDPEr 60W40; HDPEr 50W50; HDPEr 40W60 and HDPEr 30W70).The structural analysis of the WPC was correlated with the surface analysis study.Contact Angle Measurements were carried out in order to evaluate the performance of WPC. Also, the interaction between wood and the recycled Polyethylene was supported by the static water Contact Angle test showing that the Contact Angle between water and High-Density Recycled Polyethylene (HDPEr) decreases when woodflour weight percent is greater than that of the polymer, however the water Contact Angle of high-density polyethylene (HDPE) filled with 30%,40% and 50% woodflour indicated the surface roughness was improved significantly.This statement was evidenced to be in a good consistence with the overall comparative investigations.

KEYWORDS

Composites, Recycled polyethylene, Infrared X-ray, diffraction, SEM, Contact angle.